

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudio de viabilidad tecnológica y económica del uso de energía fotovoltaica para la iluminación del circuito de Castellolí

MEMÒRIA

Autor: Daniel López Mariblanca
Director: Emilio Hernández Chiva
Convocatòria: Junio 2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

En la actualidad, el uso de las **energías renovables**, en particular, la energía solar fotovoltaica, está en auge ya que es un sistema de producción de energía eléctrica no contaminante y más respetuosa desde el punto de vista medioambiental.

Este Trabajo de Fin de Grado estudia la viabilidad del uso de energía fotovoltaica para la **iluminación del circuito de Castellolí**.

El trabajo empieza con un estudio de **luminotecnia** para seleccionar el tipo de luz más adecuado, determinando la localización a lo largo del circuito de los puntos de luz para evitar zonas de oscuridad. El objetivo es garantizar a los pilotos una correcta visibilidad y una conducción segura. Este estudio es el punto de partida del trabajo ya que nos ayuda a dimensionar la **demanda energética** necesaria para alimentar el alumbrado del circuito.

A continuación, se procede al estudio del uso de **energía fotovoltaica** para la alimentación de dicho alumbrado. Por un lado, se analizan focos independientes con su propio panel fotovoltaico incorporado y, por otro, se analizan focos conectados alimentados por una granja de paneles fotovoltaicos.

Seguidamente, se realiza un estudio económico donde se calcula el presupuesto y se analiza la **viabilidad económica** de la opción seleccionada.

También se analiza la **normativa** vigente y el **impacto ambiental** del proyecto.

Finalmente, se presentan las **conclusiones** sobre la viabilidad técnica y económica del proyecto.

Sumario

| | |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| RESUMEN | 1 |
| SUMARIO | 3 |
| 1. GLOSARIO | 7 |
| 2. INTRODUCCIÓN | 9 |
| 2.1. Finalidad del proyecto | 9 |
| 2.2. Objetivos del proyecto | 9 |
| 2.3. Alcance del proyecto..... | 9 |
| 2.4. Motivación personal | 10 |
| 3. PARCMOTOR CASTELLOLÍ | 11 |
| 3.1. Historia | 11 |
| 3.2. Instalaciones | 12 |
| 3.3. Circuito de velocidad..... | 13 |
| 4. ESTADO DEL ARTE | 16 |
| 4.1. Iluminación de eventos deportivos..... | 16 |
| 4.2. Iluminación de circuitos de velocidad..... | 18 |
| 5. ESTUDIO TÉCNICO - LUMINOTECNIA | 22 |
| 5.1. Conceptos básicos de iluminación..... | 22 |
| 5.2. Selección del tipo de luz | 24 |
| 5.2.1. Luces halógenas..... | 24 |
| 5.2.2. Luces LED | 25 |
| 5.2.3. Conclusión | 26 |
| 5.3. Selección de la luminaria | 27 |
| 5.4. Software DIALux | 29 |
| 5.4.1. Estudio previo..... | 31 |
| 5.4.2. Estudio por tramos del trazado del circuito | 32 |
| 5.4.3. Resumen de luminarias..... | 44 |
| 5.5. Situación de los focos | 45 |
| 5.6. Luces de meta | 46 |
| 5.7. Luces de señalización..... | 46 |
| 5.8. Sistema de control | 48 |

| | |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 6. ESTUDIO TÉCNICO - ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA | 49 |
| 6.1. Ventajas de la energía solar | 49 |
| 6.2. Funcionamiento de una placa solar | 50 |
| 6.3. Clasificación de sistemas fotovoltaicos | 52 |
| 6.4. Componentes del sistema autónomo | 55 |
| 6.4.1. Placa fotovoltaica | 55 |
| 6.4.2. Regulador de carga..... | 57 |
| 6.4.3. Batería..... | 57 |
| 6.4.4. Inversor | 58 |
| 6.4.5. Cableado..... | 58 |
| 6.5. Configuración de las placas solares | 58 |
| 6.6. Parámetros solares..... | 61 |
| 6.7. Estudio..... | 65 |
| 6.7.1. Paneles solares | 66 |
| 6.7.2. Capacidad de las baterías | 69 |
| 6.7.3. Inversores y reguladores de carga | 72 |
| 6.8. Disposición de las placas y resto de componentes | 73 |
| 6.9. Mantenimiento y seguridad de la instalación | 74 |
| 7. SISTEMA DE CONTROL | 75 |
| 7.1. Red SIGFOX | 75 |
| 8. ESTUDIO ECONÓMICO | 77 |
| 8.1. Presupuesto | 77 |
| 8.1.1. Sistema de iluminación | 77 |
| 8.1.2. Sistema de placas solares..... | 78 |
| 8.1.3. Cableado..... | 79 |
| 8.1.4. Sistema de control..... | 79 |
| 8.1.5. Coste laboral..... | 79 |
| 8.1.6. Presupuesto final..... | 80 |
| 8.2. Inversión | 80 |
| 8.3. Viabilidad económica | 81 |
| 9. PLANIFICACIÓN | 83 |
| 9.1. Diagrama de Gantt | 83 |

| | |
|----------------------------------------------------|-----------|
| 10. NORMATIVA | 84 |
| 10.1. Normativa sobre iluminación..... | 84 |
| 10.2. Normativa fotovoltaica para autoconsumo..... | 85 |
| 11. IMPACTO AMBIENTAL | 86 |
| 11.1. Fabricación | 86 |
| 11.2. Instalación | 86 |
| 11.3. Vida útil | 87 |
| 11.4. Desmantelamiento | 87 |
| 11.5. Ahorro de emisiones contaminantes..... | 87 |
| CONCLUSIONES | 89 |
| AGRADECIMIENTOS | 90 |
| BIBLIOGRAFÍA | 91 |
| Referencias bibliográficas..... | 91 |
| Bibliografía complementaria | 95 |

1. Glosario

AC: *Alternating Current*, corriente alterna.

AGM: *Absorbed Glass Mat*, tipo de batería.

DC: *Direct Current*, corriente continua.

DIALux: software de simulación para estudios técnicos de luminotecnia.

HSP: Horas Solares Pico, medida en horas.

IMD: Intensidad Media Diaria, medida en vehículos/día.

IoT:: *Internet of Things*, Internet de las cosas.

ISM: *Industrial, Scientific and Medical*, bandas de radiofrecuencia reservadas internacionalmente.

LED: *Light-Emitting Diode*. diodo emisor de luz.

LoRa: red de comunicaciones inalámbrica.

OCCC: Oficina Catalana del Cambio Climático.

PVGIS: software online para el cálculo de la radiación en una determinada localización utilizado para estudios técnicos solares.

RD: Real Decreto.

SIGFOX: red de comunicaciones inalámbrica.

STC: irradiancia en condiciones estándar, con valor 1kW/m^2 .

TIR: Tasa Interna de Retorno.

UNB: *Ultra Narrow Band*, conectividad bidireccional.

UNE: Una Norma Española.

VAN: Valor Actual Neto.

2. Introducción

2.1. Finalidad del proyecto

La finalidad de este proyecto surge de la necesidad de iluminar de manera sostenible el circuito de velocidad del Parcmotor Castellolí.

En los circuitos de velocidad, los vehículos convencionales tienen restricciones de uso nocturno debido al impacto acústico que pudiera ocasionar a los residentes de la zona. Por el contrario, los vehículos de bajo impacto sonoro no presentan dicha problemática y se podría aprovechar esta ventaja para el uso nocturno del circuito.

Este proyecto permitiría aumentar el potencial del Parcmotor Castellolí y poder ofrecer a sus usuarios más horas de disponibilidad para la formación de pilotos, competiciones y eventos.

2.2. Objetivos del proyecto

El objetivo del proyecto es efectuar un estudio de la viabilidad técnica y económica del uso de energía fotovoltaica para la iluminación del circuito de Castellolí. Con el fin de que el estudio sea lo más riguroso posible, se tratarán los siguientes aspectos:

- Estudio técnico de luminotecnia para dimensionar las necesidades de iluminación del circuito y establecer la demanda energética necesaria.
- Aplicación de la energía fotovoltaica para la generación de la energía necesaria para satisfacer las necesidades de iluminación del circuito.
- Análisis de la viabilidad económica del proyecto.

2.3. Alcance del proyecto

El presente proyecto está orientado al circuito de Castellolí pero sería aplicable a otros circuitos que quieran potenciar el uso de la energía solar fotovoltaica para su iluminación sostenible.

2.4. Motivación personal

Este trabajo me da la oportunidad de aplicar las competencias adquiridas durante los estudios de Grado en Tecnologías Industriales.

La principal motivación es la de abordar un proyecto real en el ámbito de la ingeniería, empezando por analizar la problemática inicialmente planteada, efectuar los estudios técnicos necesarios y, finalmente, dar una propuesta de resolución.

Otro factor determinante ha sido que el proyecto trata sobre el uso de las energías renovables, un campo crucial desde el punto de vista medioambiental.

3. Parcmotor Castellolí

En este capítulo se efectúa un breve resumen de la historia y de las instalaciones del complejo en el que se realiza el presente estudio.

3.1. Historia

El proyecto del Parcmotor Castellolí [1] fue una ambiciosa iniciativa impulsada por la Federació Catalana de Motociclisme con el apoyo de la Generalitat de Catalunya. Fue presentado oficialmente el 5/11/2001 como alternativa al circuito de Montmeló para la formación de pilotos y para la celebración de campeonatos. El objetivo principal era la construcción de un complejo para la promoción del motociclismo y del automovilismo. El complejo fue inaugurado el 7/3/2009.

El complejo Parcmotor Castellolí está situado en el término municipal de Castellolí [2], en la comarca de la Anoia [3]. Se encuentra a 3 Km de Castellolí, a 8 Km de Igualada y a 50 Km de Barcelona.

Tiene una extensión de 100 Ha y dispone de varios circuitos dedicados a diferentes especialidades como karting, trial, motocross, aunque su finalidad principal es el motociclismo y el automovilismo. Se celebran entrenamientos, cursos de formación, presentaciones y eventos de las marcas, grabaciones de reportajes, desarrollo y tests de vehículos, así como, carreras de competición.

En resumen, el objetivo es orientar este complejo a la formación de pilotos y como laboratorio industrial dedicado a la automoción donde efectuar investigaciones, ensayos y homologaciones.



Figura 3.1 - Imagen aérea del complejo Parcmotor Castellolí

Fuente: www.parcmotor.com

3.2. Instalaciones

El complejo Parcmotor Castellolí dispone de diferentes instalaciones donde practicar distintas especialidades entre las que destacan:

- Circuito de velocidad.
- Circuito escuela.
- Circuito de karts.
- Circuito de motocross.
- Zona de trial.
- Zona de 4x4.
- Campus motor Anoia.
- Paintball.

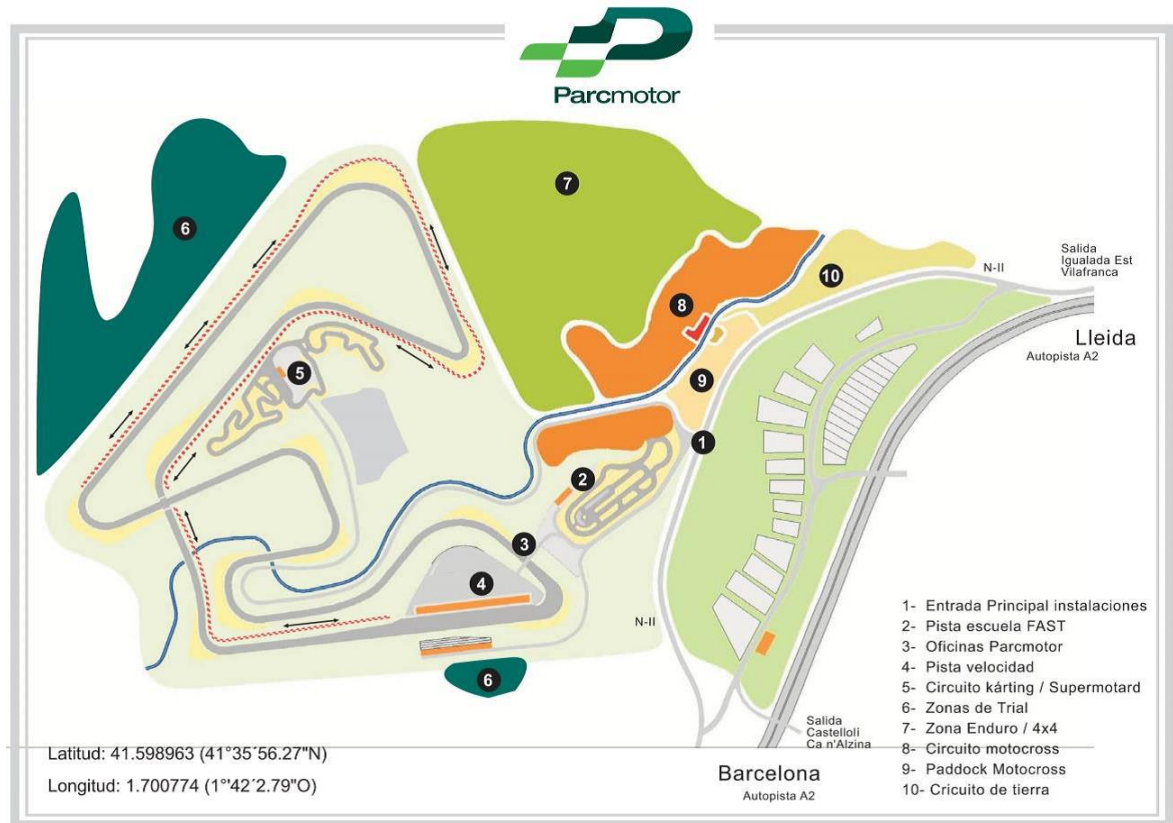


Figura 3.2 - Instalaciones del complejo ParcMotor Castellolí

Fuente: www.parcmotor.com

3.3. Circuito de velocidad

En el complejo ParcMotor Castellolí destaca su circuito de velocidad, que presenta un trazado muy técnico, con desniveles interesantes. Es el único circuito de la península que dispone de un túnel [4] [5] en su recorrido, lo que le da una personalidad única al circuito, ya que cruza el trazado a 2 niveles.

Es un marco idóneo para la celebración de entrenamientos, cursos de formación, presentaciones y eventos de las marcas, grabaciones de reportajes, desarrollo y tests de vehículos, así como, carreras de competición.

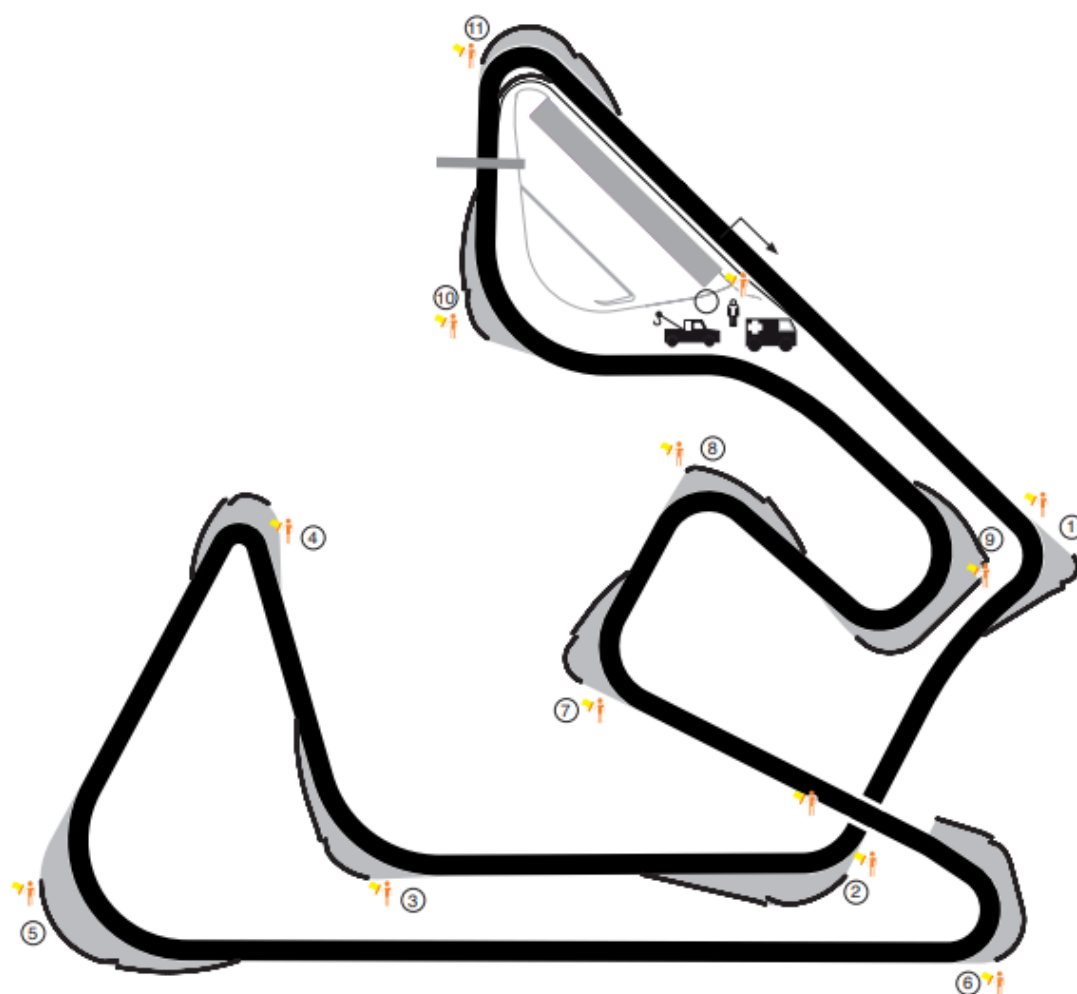


Figura 3.3 - Trazado del circuito de velocidad

Fuente: www.parcmotor.com

En la tabla 3.1 se presenta un resumen con las características técnicas del circuito de velocidad.

| Característica técnica | Dato |
|--------------------------------|---------|
| Superficie | 27 Ha |
| Longitud total | 4.146 m |
| Longitud de la recta más larga | 624 m |
| Longitud de la recta de salida | 527 m |
| Ancho de la recta de salida | 14 m |
| Ancho del resto del circuito | 12 m |
| Curvas a la derecha | 7 |
| Curvas a la izquierda | 4 |
| Pendiente máxima en subida | 9 % |
| Pendiente máxima en bajada | 8 % |

Tabla 3.1 - Características técnicas del circuito de velocidad

Fuente: www.parcmotor.com

4. Estado del arte

Una vez definida la problemática en estudio, como paso previo a cualquier inicio de proyecto, es conveniente una etapa de investigación para ver qué soluciones se han adoptado en casos similares, obtener ideas y ver si son susceptibles de mejora.

En este capítulo se analiza la iluminación de eventos deportivos [6].

4.1. Iluminación de eventos deportivos

La problemática de la iluminación de eventos deportivos nocturnos para conseguir una buena visibilidad, tanto para los participantes como para los espectadores, engloba a un amplio abanico de deportes como, por ejemplo, el tenis o el fútbol.



Figura 4.1 - Iluminación torneo de tenis

Fuente: www.ubitennis.net/2017/05/madrid

En este tipo de eventos, se observa la utilización de focos de gran potencia situados en la parte superior de los recintos deportivos para que la luz sea uniforme en todo el terreno de juego y no se generen sombras.

La mayoría de estadios presentan unas características similares. Por ejemplo, en el Camp Nou [7] se utiliza un sistema de iluminación halógena que proporciona unos 1.750 lux por

foco. Todo el estadio se ilumina con 11.190 puntos de luz, entre focos, tubos fluorescentes y lámparas, con una potencia total de 4.500 kW.



Figura 4.2 - Iluminación Camp Nou

Fuente: www.blaugranas.com

El 4/2/2018 se disputó la famosa “Super Bowl” en el U.S. Bank Stadium de Minnesota. Parece un caso similar a los anteriormente descritos pero su sistema de iluminación se basó en tecnología LED, que permitió a los espectadores una mejor visión, redujo el coste y minimizó la huella ecológica. Representa uno de los sistemas de iluminación más completos en la actualidad, permitiendo además un espectáculo visual de luces y colores.



Figura 4.3 - Iluminación Super Bowl

Fuente: www.nj.com/sports/index.ssf/2018/01/super_bowl/

4.2. Iluminación de circuitos de velocidad

Sin embargo, nuestra problemática es más compleja ya que no se trata de la iluminación de una pista central, sino de la iluminación de todo el trazado de un circuito de velocidad. Un caso más similar a nuestro estudio lo encontramos en la Fórmula 1.

El 28/09/2008 se disputó en Singapur [8] la primera carrera nocturna de la historia de la Fórmula 1. Se trató de un hecho sin precedentes hasta ese momento que causó mucho revuelo dada la incertidumbre de si los pilotos podrían conducir bajo luz artificial.

Se utilizaron unos 1500 proyectores de luz Philips a lo largo de los 5.065 m del circuito, lo que supuso 4 veces la potencia de luz utilizada en un estadio de fútbol.



Figura 4.4 - Focos en una curva del circuito de Singapur

Fuente: www.motormundial.es/gran-premio-de-singapur/2014/01/05/

Teniendo en cuenta que, en este circuito se ha llegado hasta los 311 Km/h, los ingenieros que desarrollaron el sistema de iluminación cuidaron cada detalle para que los pilotos se encontraran en unas condiciones similares a las de la luz del día y cumplir con los rigurosos protocolos de seguridad, a fin de asegurar el bienestar del piloto.

Se desarrolló un reflector especial para conseguir reproducir unas buenas condiciones de visibilidad, evitando que se produjeran reflejos de la luz al proyectarla desde diferentes ángulos, en vez de hacerlo verticalmente.

También se tuvo presente que los proyectores fueran adecuados para ofrecer una buena visión, tanto para el público asistente como para los telespectadores.

Un problema adicional que se tuvo en cuenta fueron los elementos de señalización, como las banderas de carrera o la señalización de la meta, que se solucionó sustituyéndolas por luces LED, dando además, un aspecto más estético.



Figura 4.5 - Luces LED señalizando la meta

Fuente: www.marca.com/2014/09/17/motor/formula1/gp-singapur/1410952432.html

Dado el éxito del evento, Abu Dabi en 2009 y, posteriormente, Baréin en 2014, también se decidieron por las carreras nocturnas.

Finalmente, se analiza el sistema de iluminación del circuito de moto GP de Losail en Qatar [9].

El 9/3/2008 se disputó por la noche este Gran Premio con el objetivo de reducir los accidentes debidos a las elevadas temperaturas durante el día y hacer más cómoda y segura la conducción del piloto.

Se utilizaron más de 1.000 estructuras de soporte, 3.600 focos y 500 Km de cable. El sistema de iluminación está alimentado por 44 generadores que proporcionan 13 MW de potencia, una energía equivalente a la iluminación de 70 campos de fútbol.



Figura 4.6 - Iluminación del circuito de Losail

Fuente: www.redbull.com/es-es/motogp-qatar-iluminacion-losail

Se observa en la figura 4.6 que se usaron estructuras de soporte independientes entre ellas, a diferencia del Gran Premio de Singapur de Fórmula 1 donde había una estructura común a la que se sujetaba el conjunto de focos.

5. Estudio técnico - Luminotecnia

En este capítulo se efectuará un estudio técnico para determinar la luminaria más adecuada para el proyecto, así como definir al completo todas las variables necesarias para tener una buena visibilidad en el circuito.

Se dejará para el próximo capítulo el estudio técnico relacionado con la energía solar fotovoltaica.

Para empezar, debemos partir de la premisa de que Parcmotor Castellolí, pese a tener un gran circuito de carreras no disputa un Gran Premio, lo que repercute en su nivel de ingresos. Por lo tanto, el sistema de iluminación propuesto tendrá que ajustarse a estas circunstancias. No sería lógico tratar de instalar la iluminación de los circuitos mencionados en el capítulo “*Estado del Arte*”, ya que estos circuitos cuentan con grandes ingresos y se pueden permitir focos de gran potencia y calidad.

Además, el objetivo del sistema de iluminación será el de ofrecer a los pilotos una buena visibilidad nocturna. Como no habrá retransmisión televisiva ni público, sería innecesario el uso de focos de excelente calidad.

En resumen, se trata de buscar un sistema de iluminación adecuado pero económico, tratando de minimizar, en todo momento, los costes.

5.1. Conceptos básicos de iluminación

Como paso previo al inicio del estudio, es necesario tener nociones teóricas sobre iluminación [10] [11], para lo cual, hay que conocer los siguientes conceptos:

- **Flujo luminoso (Φ)**

Flujo total lumínico emitido o radiado en todas direcciones por una fuente de luz durante una unidad de tiempo.

Unidad: lumen (lm)

- **Intensidad luminosa (I)**

Flujo luminoso emitido por una fuente de luz en una dirección determinada.

Unidad: candela (cd)

$$I = \frac{\Phi}{\omega}$$

- **Iluminancia (E)**

Flujo luminoso que incide sobre una superficie.

Unidad: lux (lx)

$$E = \frac{\Phi}{S}$$

- **Luminancia (L)**

Intensidad luminosa por unidad de superficie aparente de una fuente de luz primaria o secundaria (reflejada). Es la magnitud que el ojo puede detectar. A mayor luminancia, mayor es la sensación de claridad pero, una luminancia demasiado elevada puede provocar deslumbramiento.

Unidad: luminancia (cd/m²)

$$L = \frac{I}{S \cdot \cos \alpha}$$

- **Uniformidad**

Iluminancia proporcionada sobre la superficie de referencia. Se trata de una magnitud importante para el confort y la visión. Existen varios indicadores de uniformidad, entre los que destacan:

- Factor de uniformidad longitudinal (U_L)
Relación entre la luminancia mínima y máxima longitudinal de una instalación.
- Factor de uniformidad general (U₀)
Relación entre la luminancia mínima y media.

- **Deslumbramiento**

Disminución de la capacidad visual debido al exceso de luminancia del objeto que se observa o incide sobre el ojo.

El “*Incremento Umbral*” (TI), que se expresa en porcentaje, es la medida de la pérdida de visibilidad causada por el deslumbramiento perturbador producido por las luminarias del alumbrado público. Un valor adecuado sería inferior al 10%.

- **Contraste**

Relación entre la luminancia de un objeto y la luminancia de su fondo.

- **Eficacia luminosa**

Rendimiento luminoso. No toda la energía se transforma en luz, una parte se pierde en forma de calor o radiación no visible.

Unidad: (lm/W)

$$\eta = \frac{\Phi}{P}$$

Donde P es la potencia eléctrica de la lámpara (W).

5.2. Selección del tipo de luz

El primer punto a analizar en un estudio de luminotecnia es determinar el tipo de luz a usar. Para ello, se detallarán las principales ventajas e inconvenientes de cada tipo para poder escoger la mejor opción.

Pese a haber una gran variedad de tipos de luces, se compararán [12] las dos principales que se encuentran en el mercado, como son: las luces halógenas y las luces LED.

5.2.1. Luces halógenas

Este tipo de luz se puede encontrar en multitud de hogares, automóviles y en la iluminación de estadios y monumentos. Gracias a sus características es el tipo de luz más usado para la iluminación exterior.



Figura 5.1- Foco halógeno

Fuente: <https://www.amazon.es/focos-halogenos-externor>

Los proyectores halógenos son los más comunes debido a su sencillez y a su bajo coste. Aunque ahorran un 30% más que las bombillas tradicionales, su principal problema es el rendimiento que presentan, ya que gran parte de la energía que consumen se pierde en forma de calor, siendo delicada su manipulación. El tiempo de encendido no es instantáneo y tampoco lo es el tiempo de reencendido.

Son más caras que las luces tradicionales pero, la luz que proporcionan es más potente, más nítida y más blanca.

La vida útil de las luces halógenas es de unas 2.000 horas.

5.2.2. Luces LED

Este tipo de luz [13] es más cara pero presenta el mejor rendimiento del mercado.



Figura 5.2 - Foco LED

Fuente: <https://www.amazon.es/focos-led-externior>

Se ahorra un 90% más que con las bombillas incandescentes normales y como no se calientan, son recomendables para lugares donde deban estar encendidas mucho tiempo.

Su iluminación es inmediata, es decir, se alcanza la máxima luminosidad justo en el momento de encenderlas y no se ven afectadas por el número de encendidos y apagados.



Figura 5.3 - Calle de Bristol (Inglaterra) iluminada con luces LED

Fuente: www.connectingbristol.org/what-is-the-humble-lamppost/

Como se observa en la figura 5.3, la calidad de este tipo de luz es muy buena, ofreciendo una visibilidad excelente.

Pese a tener un coste más elevado, esta inversión se amortiza con el paso del tiempo debido a su bajo consumo y a su larga duración.

La vida útil de las luces LED es de unas 30.000 a 50.000 horas.

5.2.3. Conclusión

La tendencia que se observa en el mercado es el declive de las luces halógenas y el crecimiento de las luces LED. Son más caras pero, debido a su menor consumo energético y a su larga durabilidad, se amortizan en pocos años.

Otro factor determinante en la elección del tipo de luz es que el objetivo del proyecto es alimentar estas luces mediante energía solar, por lo que el rendimiento será crucial.

Debido a los motivos anteriormente expuestos, nos decantamos por la tecnología LED.

5.3. Selección de la luminaria

Una vez se ha decidido que la luz será tipo LED, el estudio se centrará en determinar la mejor luminaria. Se ha optado por la marca Philips, número 1 en ventas y líder mundial en tecnología LED, para asegurarnos que se adquiere un producto fiable y de calidad.

Ahora, la duda principal se centra entre escoger una luz tipo “farola” o foco.

Vial general



Figura 5.4 - Extracto del catálogo de Philips (farolas)

Fuente: www.lighting.philips.es

Deportes



Figura 5.5 - Extracto del catálogo de Philips (focos)

Fuente: www.lighting.philips.es

La utilización de farolas es más económica que los focos pero, hay que tener en cuenta que, las farolas son para uso en carreteras, donde los automóviles ya cuentan además con su propio juego de luces. En nuestro caso, los vehículos de competición no suelen disponer de luces, lo que podría hacer insuficiente la visibilidad en la pista. En un deporte donde se pueden alcanzar los 300 Km/h se ha de velar por la seguridad.

Además, también es importante ver que, dependiendo del sector del circuito, la luminaria deberá estar situada a una altura determinada para ofrecer una buena visibilidad. Éste, es

otro punto a favor de los focos que, no están sujetos a unas alturas determinadas y pueden ir fijados a cualquier estructura de soporte.

Otro factor que limita el uso de farolas es que su rango de inclinación oscila entre 0 y 15 grados, en cambio, los focos, en función de la distancia del poste a la pista, se pueden colocar a la inclinación deseada.

Analizando las ventajas e inconvenientes de cada una de las opciones, vemos que el uso de focos se adapta mejor a nuestra problemática.

Dentro del amplio catálogo de focos Philips, descartamos los focos ArenaVision y OptiVision ya que están orientados a retransmisiones deportivas, siendo de una excelente calidad pero con un precio muy elevado.

Se descarta el foco OptiFlood LEDgine porque su bonito diseño encarece su precio y porque solo llega hasta los 154 W, que parecen insuficientes.

También descartamos el foco CoreLine Tempo LED Grande que, pese a ser el más económico y tener una rápida amortización, está limitado a 215 W, insuficientes para cuando la distancia de poste a pista sea elevada. Además, este foco no es regulable.

Finalmente, nos decidimos por el foco ClearFlood. Este tipo de foco oscila entre 49 W (823 €) y 285 W (1.300 €).

También se dispone de una versión más potente, el foco ClearFlood Large, que oscila entre 285 W (1.960 €) y 532 W (2.480 €).



Figura 5.6 - Focos ClearFlood y ClearFlood Large

Fuente: <http://www.lighting.philips.es/prof/luminarias-de-externo/proyectores-para-deportes-ares-y-gasolineras/area-and-recreational-floodlighting/clearflood>

De entrada, se usará la versión normal y solo se recurrirá a la versión más potente en caso

necesario.

Se escoge el tipo simétrico.

Este tipo de foco es regulable y dispone de un rango de potencias que oscila entre 49 W y 285 W. Dependiendo del tramo del circuito se instalarán unos u otros, usando los de menor potencia posible para ahorrar en el coste del foco y en energía.

También se ha de tener en cuenta que en el trazado del circuito hay un túnel. En este caso, tenemos 2 opciones:



Figura 5.7 - Extracto del catálogo de Philips (túneles)

Fuente: www.lighting.philips.es

Se usará el TubeLine, ya que presenta una iluminación lineal que ofrece una conducción segura y una gran calidad de luz, proporcionando un elevado confort visual.

Oscila entre 22 W (421 €) y 108 W (486 €).

5.4. Software DIALux

Existen procedimientos teóricos para poder efectuar estudios de luminotecnia como son el “Método punto por punto” o el “Método del lúmen” [10]. Sin embargo, este estudio se realizará mediante un software específico en vez de mediante cálculos teóricos, debido a su mayor potencia y rapidez de las simulaciones.

En la actualidad, hay varios programas que facilitan el trabajo de diseñar sistemas de iluminación, como son: DIALux, Relux, Lumenac o Calculux [14] [15].

Para el presente estudio se ha optado por usar el programa DIALux del Instituto Alemán de Luminotecnia Aplicada, ya que es el software gratuito más utilizado debido a su gran potencia, profesionalidad y facilidad de uso. Una de sus virtudes es que, mediante los Plugin suministrados por los fabricantes de luminarias, se puede efectuar el estudio con la luminaria

deseada.

Para nuestro estudio se ha descargado DIALux 4.13 y los Plugin de Philips.

El estudio se efectúa mediante el Asistente DIALux con “Planificación rápida de viales”, introduciendo los siguientes parámetros:

- Factor de mantenimiento: 0.80
Por normativa.
- Anchura de la calle.
- Clase de iluminación: ME 1
Es la usada en calles de alta velocidad con IMD elevado. Es la que exige una mejor luminosidad.

| Parámetros | Valor límite | Unidad | Base |
|----------------------------------------|--------------|-------------------|---------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Lm | 2.00 | cd/m ² | (Luminancia) |
| <input checked="" type="checkbox"/> U0 | 0.40 | | (Luminancia) |
| <input checked="" type="checkbox"/> UI | 0.70 | | (Luminancia) |
| <input checked="" type="checkbox"/> TI | 10 | % | (Luminancia) |
| <input checked="" type="checkbox"/> SR | 0.50 | | (Iluminancia) |
| | | | |
| | | | |

Figura 5.8 - Parametrización DIALux para el estudio

Fuente: propia

A continuación, seleccionamos la luminaria escogida: “ClearFlood”

Después, se determinan los parámetros de las variables de disposiciones. Habrá 4 parámetros que podrán variar para ser optimizados, indicando un valor mínimo y un valor máximo:

- Distancia entre mástiles: > 12 m
- Altura del punto de luz: entre 3 y 12 m
- Saliente del punto de luz.
Indica la distancia mástil-calzada. Este parámetro no depende de nosotros sino de las características del circuito y variará dependiendo del tramo del trazado del circuito.
- Inclinación: entre 0 y 70°

Por motivos de seguridad es evidente que no se pondrán los postes justo al lado del trazado ya que si un vehículo se saliera de la pista impactaría contra él causando un grave accidente. Por lo tanto, se instalarán fuera del espacio de circulación del circuito, protegidos por los

márgenes de seguridad.

La disposición será unilateral, es decir, se situará en un lado del trazado.

Como paso final, validamos los parámetros introducidos y lanzamos la optimización a efectuar por DIALux.

5.4.1. Estudio previo

Se realiza mediante el software DIALux un estudio previo para analizar qué potencias usar dependiendo de la distancia entre poste-pista.

Primero, analizamos qué potencias son las adecuadas para tener una disposición unilateral con un ancho de 12 metros. Fijando una altura entre 3 y 12 metros y una distancia mínima entre postes de 15 metros, obtenemos los resultados de la tabla 5.1.

Empezando por la mayor potencia (285 W), vamos disminuyendo gradualmente hasta llegar a una potencia insuficiente.

| Potencia (W) | Distancia máxima poste-pista (m) |
|--------------|-------------------------------------|
| 285 | 19,7 |
| 220 | 15,5 |
| 160 | 10,1 |
| 142 | - |

Tabla 5.1 - Estudio DIALUX de potencias

Fuente: propia

Por tanto, dependiendo de la distancia usaremos una de estas 3 potencias.

Por lo que respecta a la recta principal (14 m de anchura), los 160 W son insuficientes, mientras que los 220 W serían los adecuados.

5.4.2. Estudio por tramos del trazado del circuito

En este apartado, mediante simulaciones con el software DIALux, se analizarán las luminarias necesarias en función del tramo para adaptarnos mejor al trazado del circuito. Para ello dividiremos el trazado del circuito en diferentes tramos.

5.4.2.1. Recta principal

Se introducen los parámetros, usando una anchura de carretera de 14 m. La potencia será de 220 W.

Para el primer tramo (200,00 m), los postes se situarán en la parte inferior a una distancia de 2,50 m de la pista de manera que con el mismo poste haya un foco iluminando la recta y otro iluminando los boxes, ya que al medir aproximadamente unos 14 m, el estudio de la recta servirá también para los boxes y se aprovecharán los mismos postes.



*Figura 5.9 - Recta pr.
Fuente: propia*



*Figura 5.10 - Situación de los postes (línea roja)
Fuente: propia*

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 11,5 m
- Distancia entre postes: 17 m
- Inclinação del foco: 50°
- Número total de focos: $(200,00 / 17) \times 2 \text{ lados} = 11,76 \rightarrow 12 \times 2 = 24 \text{ focos}$

Para el segundo tramo (333,94 m), los postes estarán situados al otro lado, ya que estarán más cerca y podrán situarse hasta el final de la recta. En este caso, estarán a una distancia de 6,49 m.



Figura 5.11 - Recta pr.

Fuente: propia



Figura 5.12 - Situación de los postes (línea roja)

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 7 m
- Distancia entre postes: 18,5 m
- Inclinación del foco: 65°
- Número total de focos: $(333,94 / 18,5) = 18,05 \rightarrow 18$ focos

5.4.2.2. Curva 1

A partir de este momento la anchura será de 12 m. Para la 1ª curva situaremos un poste que sujetará 3 focos situados a unos 19,6 m de la pista, con lo que el estudio será común para ellos. Utilizaremos la potencia de 285 W.



Figura 5.13 - Curva 1

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar los focos: 12 m
- Inclinación del foco: 65°
- Número total de focos: 3

5.4.2.3. Recta 2

La distancia será de 9.81 m. Usaremos la potencia de 160 W.



Figura 5.14 - Recta 2

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 8 m
- Distancia entre postes: 15,2 m
- Inclinación del foco: 60°
- Número total de focos: $(203,96 / 15,2) = 13,41 \rightarrow 14$ focos

5.4.2.4. Túnel

La luminaria, al ser un túnel corto (22,58 m de largo) y encenderse solo por la noche, se mantiene el mismo nivel de iluminación que para el resto del circuito.



Figura 5.15 - Túnel

Fuente: propia

Se utiliza el de tipo simétrico con potencia de 108 W (la máxima que ofrece el catálogo).

Como no se dispone del Plugin de esta luminaria, se efectúa el estudio con una similar obteniendo los siguientes resultados:

- Distancia entre luminarias: se instalarán 2 filas de luminarias separadas por 6 m y, en cada fila, las luminarias estarán cada 50 cm.
- Número luminarias por fila: $(22,58 / 2,5) = 9$
- Número total de luminarias: $9 \times 2 = 18$

5.4.2.5. Curva 2, recta 3 y curva 3

En este caso, podemos efectuar un estudio conjunto ya que, como se observa en la figura 5.16, la distancia se mantiene aproximadamente en 10,80 m y las curvas no son muy cerradas. La potencia usada es de 220 W.



Figura 5.16 - Curva 2, recta 3 y curva 3

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 8,5 m
- Distancia entre postes: 18,6 m
- Inclinação del foco: 60°
- Número total de focos: $(405,95 / 18,6) = 21,82 \rightarrow 22$ focos

5.4.2.6. Recta 4 (sin la parte final)

La parte final de esta recta se estudiará aparte ya que, en la parte final se ensancha 19,5 m. La distancia poste-pista es de 7,19 m, con lo que usaremos la potencia de 160 W.



Figura 5.17- Recta 4

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 5 m
- Distancia entre postes: 16 m
- Inclinação del foco: 70°
- Número total de focos: $(152,08 / 16) = 9,505 \rightarrow 10$ focos

5.4.2.7. Final de recta 4

Usaremos la potencia de 285 W.

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 12 m
- Distancia entre postes: 15,14 m
- Inclinação del foco: 65°
- Número total de focos: $(46,64 / 15,14) = 3,08 \rightarrow 3$ focos

5.4.2.8. Curva 4 y principio de recta 5

Desde un mismo poste, se usarán 2 focos para iluminar bien la curva, cada uno situado a la altura apropiada. Además, se aprovechará el poste para iluminar el inicio de la recta con otro foco. Se usarán 2 focos de 285 W y uno de 220 W.



Figura 5.18 - Curva 4

Fuente: propia

Resultados primer foco:

- Altura donde situar el foco: 11,5 m
- Inclinación del foco: 65°

Resultados segundo foco:

- Altura donde situar el foco: 12 m
- Inclinación del foco: 60°

Resultados tercer foco (220 W):

- Altura donde situar el foco: 9,5 m
- Inclinación del foco: 60°

5.4.2.9. Recta 5

La distancia poste-pista será de 9,75 m, con lo que usaremos la potencia de 160 W.



Figura 5.19 - Recta 5

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 8 m
- Distancia entre postes: 15,2 m
- Inclinación del foco: 60°
- Número total de focos: $(216,99 / 15,2) = 14,2 \rightarrow 15$ focos

5.4.2.10. Curva 5 e inicio de recta 6

Como los postes estarán aproximadamente a 16 m unificaremos estudios. Usaremos la potencia de 285 W.



Figura 5.20 - Curva 5

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 12 m
- Distancia entre postes: 17,8 m
- Inclinação del foco: 60°
- Número total de focos: $(249,08 / 17,8) = 13,99 \rightarrow 14$ focos

5.4.2.11. Recta 6

Para este tramo, debido a que hay un desnivel considerable, los postes se deberán colocar al otro lado. Estarán a una distancia de 8,48 m. Se usa la potencia de 160 W.



Figura 5.21 - Recta 6

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 7 m
- Distancia entre postes: 16,2 m
- Inclinação del foco: 60°
- Número total de focos: $(506,71 / 16,2) = 31,27 \rightarrow 32$ focos

5.4.2.12. Curva 6

Aprovechamos el estudio efectuado para la curva 5 y el inicio de la recta 6, ya que también mide 16 m, con la potencia de 285 W.



Figura 5.22 - Curva 6

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 12 m
- Distancia entre postes: 17,8 m
- Inclinação del foco: 60°
- Número total de focos: $(63,53 / 17,8) = 3,57 \rightarrow 4$ focos

5.4.2.13. Recta 7 (techo del túnel)

La distancia poste-pista es de 3,55 m. Usaremos la potencia de 160 W.



Figura 5.23 - Recta 7

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 11,5 m
- Distancia entre postes: 13,8 m
- Inclinación del foco: 50°
- Número total de focos: $(100,3 / 13,8) = 7,27 \rightarrow 8$ focos

5.4.2.14. Recta 7, curva 7, recta 8 y curva 8

Para las cuatro zonas, nos encontramos con una distancia de 16 m. Por tanto, reutilizamos el estudio efectuado anteriormente (con la potencia de 285 W).

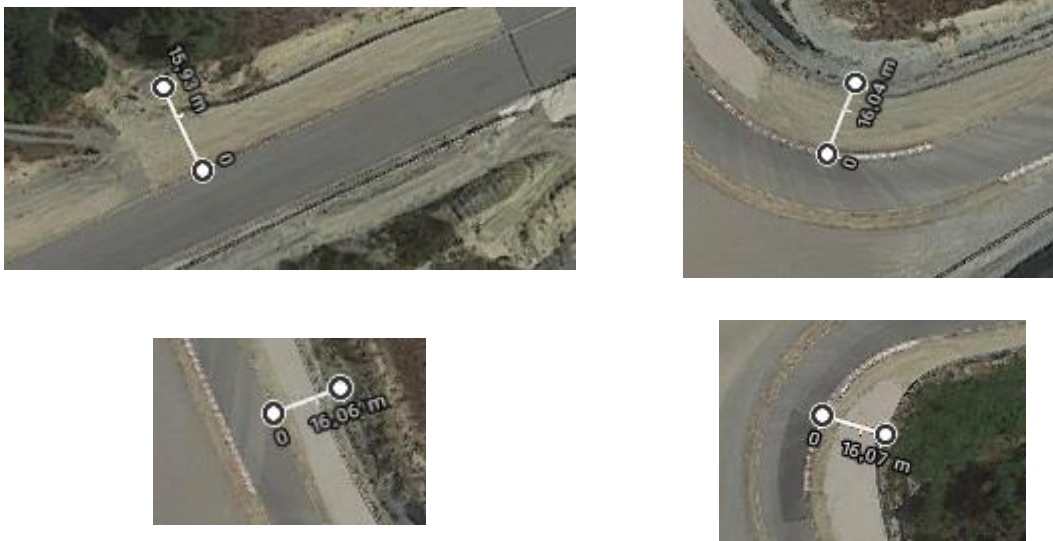


Figura 5.24 - Recta 7, curva 7, recta 8 y curva 8

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 12 m
- Distancia entre postes: 17,8 m
- Inclinación del foco: 60°
- Número total de focos: $(288,25 / 17,8) = 16,2 \rightarrow 17$ focos

5.4.2.15. Recta 9

Nos encontramos con un caso similar al de la curva 2, recta 2 y curva 3, con lo que reutilizamos el estudio efectuado previamente, con una potencia de 220 W.



Ilustración 5.25 - Recta 9

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 8,5 m
- Distancia entre postes: 18,6 m
- Inclinação del foco: 60°
- Número total de focos: $(98,97 / 18,6) = 5,32 \rightarrow 6$ focos

5.4.2.16. Final de recta 9, curva 9 e inicio de recta 10

Reutilizamos el mismo estudio para las siguientes zonas, que se encuentran a 18,1 m de la pista, con una potencia de 285 W.

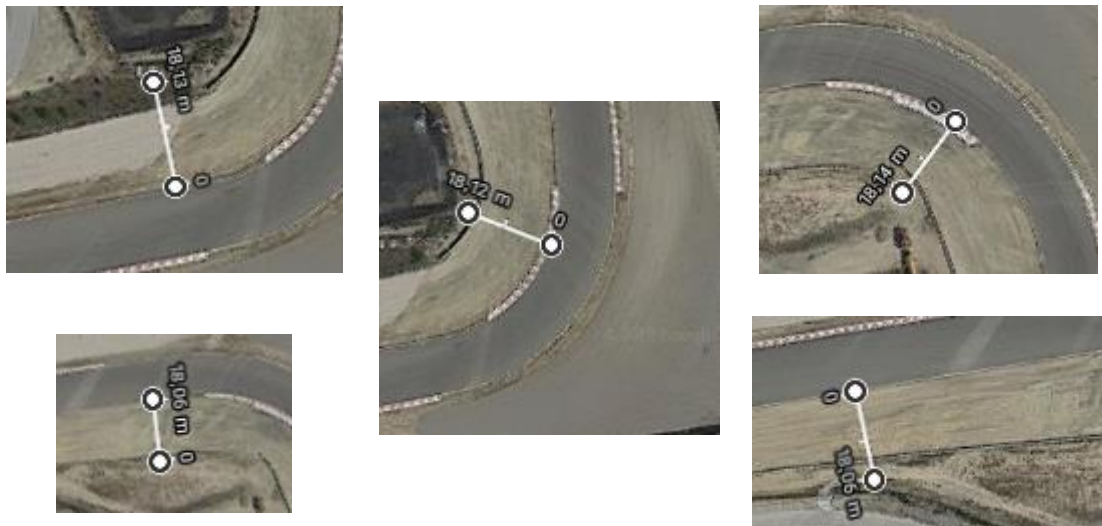


Figura 5.26 - Final recta 9, curva 9 e inicio recta 10

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 11 m
- Distancia entre postes: 15,9 m
- Inclinación del foco: 65°
- Número total de focos: $(162,18 / 15,9) = 10,2 \rightarrow 11$ focos

5.4.2.17. Recta 10

En esta recta, la distancia poste-pista es de 13,6 m. Usaremos la potencia de 220 W.



Figura 5.27 - Recta 10

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 10,5 m
- Distancia entre postes: 16,5 m
- Inclinación del foco: 60°
- Número total de focos: $(207,06 / 16,5) = 12,55 \rightarrow 13$ focos

5.4.2.18. Curva 10 y recta 11 (hasta el puente)

La distancia poste-pista es de 16 m. Reutilizamos el estudio efectuado anteriormente, con potencia de 285 W.



Figura 5.28 - Curva 10 y recta 11

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 12 m
- Distancia entre postes: 17,8 m
- Inclinación del foco: 60°
- Número total de focos: $(163,31 / 17,8) = 9,17 \rightarrow 10$ focos

5.4.2.19. Recta 11 (después del puente)

Para este último tramo, aunque la distancia sea de 9,03 m, usaremos la potencia de 285 W, ya que la longitud de pista será de 12 m más el carril para entrar a boxes (5 m). Para efectuar la simulación usaremos una anchura de pista de 17 m para así utilizar solo un foco para iluminar ambos carriles.



Figura 5.29 - Recta 11

Fuente: propia

Resultados:

- Altura donde situar el foco: 7,5 m
- Distancia entre postes: 19,5 m
- Inclinación del foco: 65°
- Número total de focos: $(30,27 / 19,5) = 1,55 \rightarrow 2$ focos

5.4.2.20. Curva 11

Situaremos tres focos en la curva, uno a una distancia de la pista de 6 m (con una anchura a cubrir de 30 m), con potencia 285 W.

Los otros dos, en un mismo poste, a una distancia de 3,57 m de la pista con una anchura de pista a cubrir también de 30 m.

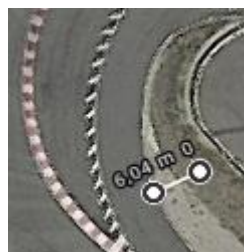


Figura 5.30 - Curva 11

Fuente: propia

Resultados (primer foco):

- Altura donde situar el foco: 10 m
- Inclinación del foco: 65°

Resultados (otros 2 focos):

- Altura donde situar el foco: 9 m
- Inclinación del foco: 65°

5.4.3. Resumen de luminarias

En la tabla 5.2 se presenta el resumen de las luminarias utilizadas en el estudio:

| Tipo de luminaria | Potencia (W) | Nº unidades |
|-------------------|--------------|-------------|
| ClearFlood | 160 | 79 |
| ClearFlood | 220 | 84 |
| ClearFlood | 285 | 69 |
| TubeLine | 108 | 18 |

Tabla 5.2 - Resumen de luminarias

Fuente: propia

Por lo tanto, la potencia total necesaria para la iluminación del circuito será de 52.729 W = **52,73 kW**.

En este capítulo, dedicado al estudio técnico de luminotecnia, se han dimensionado las necesidades de iluminación del circuito y se ha establecido la demanda energética necesaria, que será el punto de partida del siguiente capítulo dedicado al estudio técnico de la energía solar fotovoltaica.

5.5. Situación de los focos

En la figura 5.31, con el objetivo de hacer más visual lo comentado durante este capítulo, se muestra, marcado en rojo, las líneas donde irán situados los focos.



Figura 5.31 - Situación de los focos a lo largo del trazado del circuito

Fuente: propia

5.6. Luces de meta

En la línea de meta hay que situar el semáforo para indicar el inicio de carrera. En concreto, serán 10 luces de color rojo, 5 naranjas y 5 verdes.

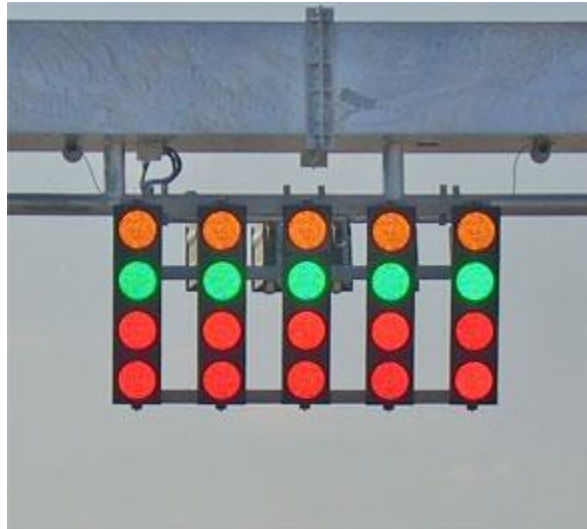


Figura 5.32 - Semáforo de salida

Fuente: www.racesimonline.com/articulos/NormasDeBuenaConductaEnPista.php

Para la compra de este semáforo se ha de acudir a una empresa especializada.

Para el presente trabajo, estas luces de meta no se tendrán en cuenta desde el punto de vista energético ni económico, ya que la energía utilizada por este semáforo no es relevante comparativamente con la iluminación del circuito.

5.7. Luces de señalización

Como en todo circuito, debe existir un modo de señalar a los pilotos que ha habido un accidente para que estén alerta y disminuyan la velocidad.

En el circuito de Castellolí, figura 5.33, hay 13 puntos de señalización definidos.

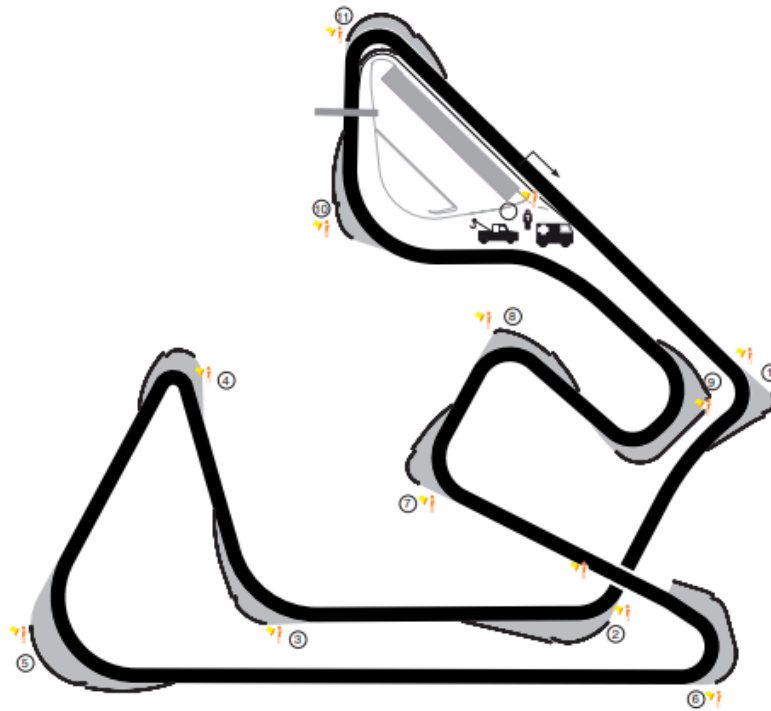


Figura 5.33 - Situación de los puntos de señalización

Fuente: www.parcmotor.com/ca/informacio-interes

Además de la típica bandera a cuadros, se cuenta con otros 8 tipos de banderas.



Figura 5.34 - Banderas de señalización

Fuente: www.parcmotor.com/ca/informacio-interes

Por lo tanto, se tendrá que disponer de pantallas LED multicolor de cara a realizar la función de las banderas durante su uso nocturno.

Para el presente trabajo, estas luces de señalización no se tendrán en cuenta desde el punto de vista energético ni económico, ya que la energía utilizada no es relevante comparativamente con la iluminación del circuito.

5.8. Sistema de control

En este trabajo no se ha tenido en cuenta el uso de sensores de luz que activen el encendido automático de los focos cuando se detecta la falta de luz ya que el circuito solo se iluminará cuando se vaya a utilizar. Se habilitará un sistema de control para el encendido/apagado remoto con la tecnología descrita en el capítulo 7.

6. Estudio técnico - Energía solar fotovoltaica

En el capítulo anterior se realizó el estudio técnico de luminotecnia para conocer la demanda energética necesaria para alimentar el alumbrado del circuito.

En este capítulo se efectuará un estudio técnico sobre la energía solar fotovoltaica, donde se calculará el número de placas solares necesarias para el proyecto, así como la capacidad que deberán tener las baterías para el correcto almacenamiento de la energía eléctrica generada.

También se detallará la ubicación óptima para la colocación de las placas solares.

6.1. Ventajas de la energía solar

La energía solar tiene una serie de ventajas respecto a sus alternativas que la hacen muy interesante y con una proyección al alza. Sus ventajas principales [16] [17] son:

- **Renovable.**
Es capaz de transformar los rayos solares en energía eléctrica.
- **Inagotable.**
La energía del Sol no corre el riesgo de desaparecer ya que aún quedan millones de años hasta que el Sol se extinga.
- **Limpia.**
En el proceso químico para la obtención de electricidad no se necesita la combustión, con lo que no emite sustancias dañinas para el medio ambiente.
- **Económica.**
Solo requiere de una inversión inicial que a los pocos años se amortiza.
- **Duradera.**
La vida útil de una instalación solar es superior a los 20 años, pudiendo llegar a superar los 30, dependiendo de la calidad de los componentes utilizados y del mantenimiento realizado a lo largo de los años.
- **Fiable.**
Pese a que las energías renovables son susceptibles de sufrir altibajos en función de las condiciones meteorológicas, si se instalan en zonas adecuadas, prácticamente todos los días del año se dispondrá de esta energía.
- **Autoconsumo.**
Es ideal para las zonas rurales alejadas que no disponen de acceso a la red eléctrica.

- Transportable.
Presenta una fácil instalación y desinstalación de todo el sistema.
- Estética.
No efectúa una destrucción del paisaje como otras energías, tanto renovables como no renovables.
- Silenciosa.
Las placas solares no tienen partes móviles lo que conlleva que no haya ruido.
- Dimensionable.
Apta tanto para grandes plantas como para una casa, simplemente variando el número de placas a instalar.

Pese a haber otras energías renovables que también son viables, la energía solar encabeza la lista ya que no cuenta con importantes inconvenientes. Las desventajas de otras energías renovables son: una difícil instalación, un gran coste de instalación y un gran impacto paisajístico (por ejemplo, la energía eólica); emisiones de ácido sulfhídrico y CO_2 , riesgo de contaminación de aguas cercanas al lugar con arsénico o amoníaco y deterioro del paisaje (por ejemplo, la energía geotérmica).

6.2. Funcionamiento de una placa solar

Los paneles solares transforman la energía luminosa del Sol en energía eléctrica a través de lo que se conoce como efecto fotovoltaico.

Estos paneles solares están formados por un conjunto de células fotovoltaicas, que son de un material semiconductor, generalmente de silicio cristalino. Es en cada una de estas celdas donde realmente tiene lugar el efecto fotovoltaico.



Figura 6.1 - Célula fotovoltaica

Fuente: Wikipedia

El esquema de funcionamiento sería el siguiente:

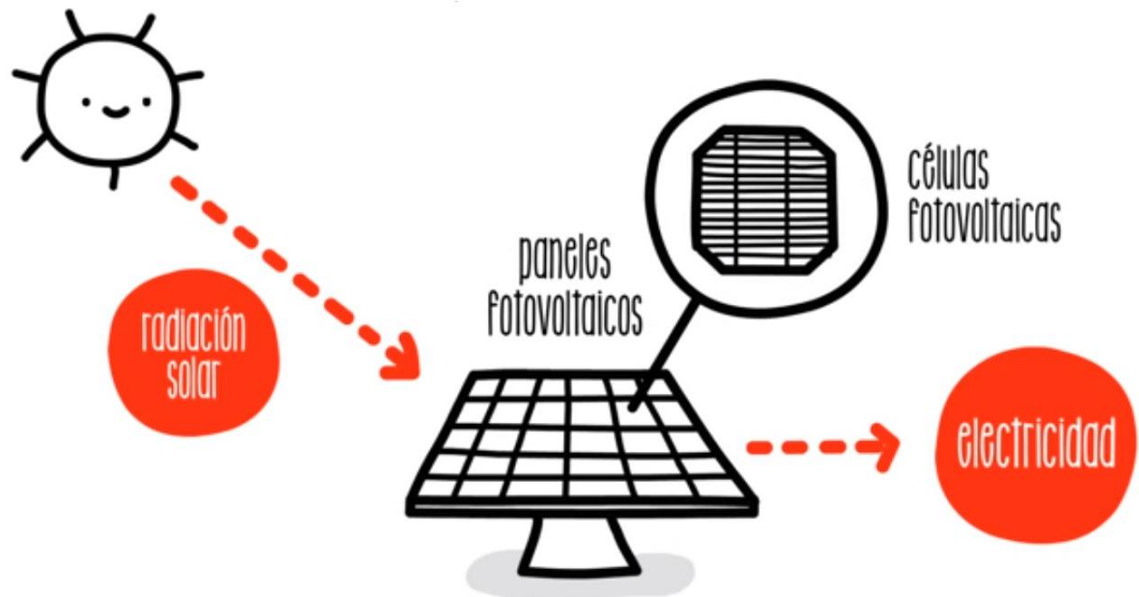


Figura 6.2 - Esquema del proceso de un panel solar

Fuente: https://www.youtube.com/watch?time_continue=39&v=h20bJDZCaCk

Una celda fotovoltaica, habitualmente, es una hoja de silicio de gran pureza tratada químicamente con boro y fósforo, con electrodos metálicos en las dos caras.

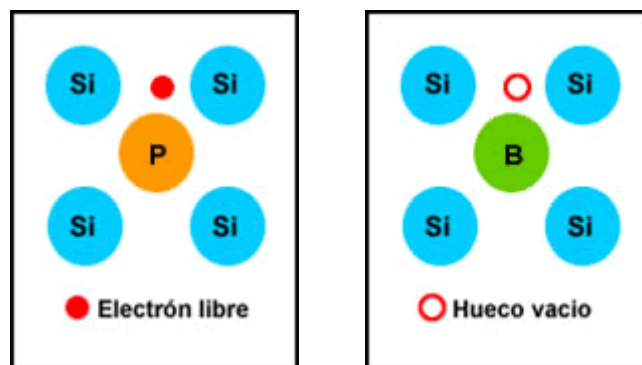


Figura 6.3 - Representación química del silicio (Si) dopado con fósforo (P) y boro (B)

Fuente: <http://solete.nichese.com/unionnp.html>

En la capa superior de la celda, con el fósforo (tipo N), tenemos un exceso de electrones libres (electrodo negativo).

En la capa inferior de la celda, con el boro (tipo P), tenemos un déficit de electrones libres (electrodo positivo).

Entre ambas capas habrá una capa conductora.

En la parte superior, se utiliza una capa antirreflejo que aumenta la eficacia de la célula.

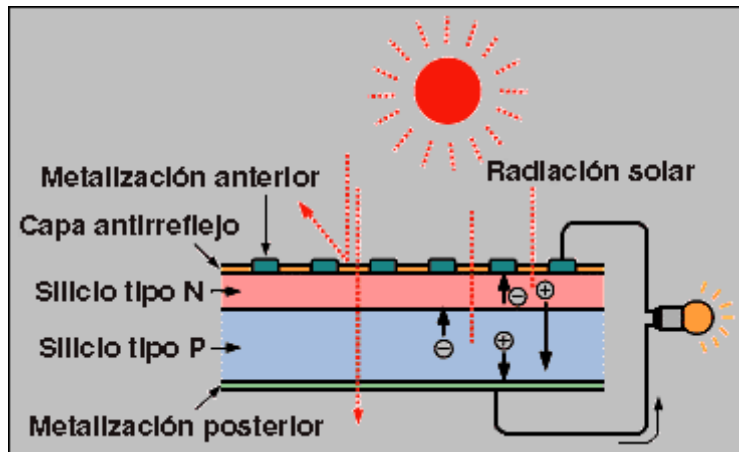


Figura 6.4 - Esquema del funcionamiento de una placa solar

Fuente: <http://www.solener.com/pregunta.html>

La luz que emite el Sol contiene fotones. Cuando éstos llegan a la célula fotovoltaica, si la energía que aportan es suficiente para vencer la fuerza que mantiene los electrones unidos al átomo, estos electrones se liberan y llegan a formar una corriente de electrones (electricidad).

La corriente circula desde el electrodo negativo, que posee un exceso de electrones, de carga negativa, hacia el electrodo positivo, que presenta un déficit de electrones.

En resumen, la luz solar incide sobre la placa generando en la célula fotovoltaica un impulso eléctrico en forma de corriente continua, creando una corriente proporcional a la radiación incidente.

La corriente que genera cada celda es muy pequeña, es por eso, que se agrupan en serie un conjunto de celdas para conseguir una corriente mayor formando una placa solar.

6.3. Clasificación de sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar [18] en dos grupos según su conexión:

- Con conexión a red.
- Sin conexión a red o autónomos.

Los sistemas que disponen de conexión a red se caracterizan por verter a la red eléctrica la

energía sobrante producida por las placas solares que no se ha consumido.

En la figura 6.4 se presenta el esquema de un sistema combinado con electricidad procedente de placas solares y con electricidad suministrada por la red eléctrica.

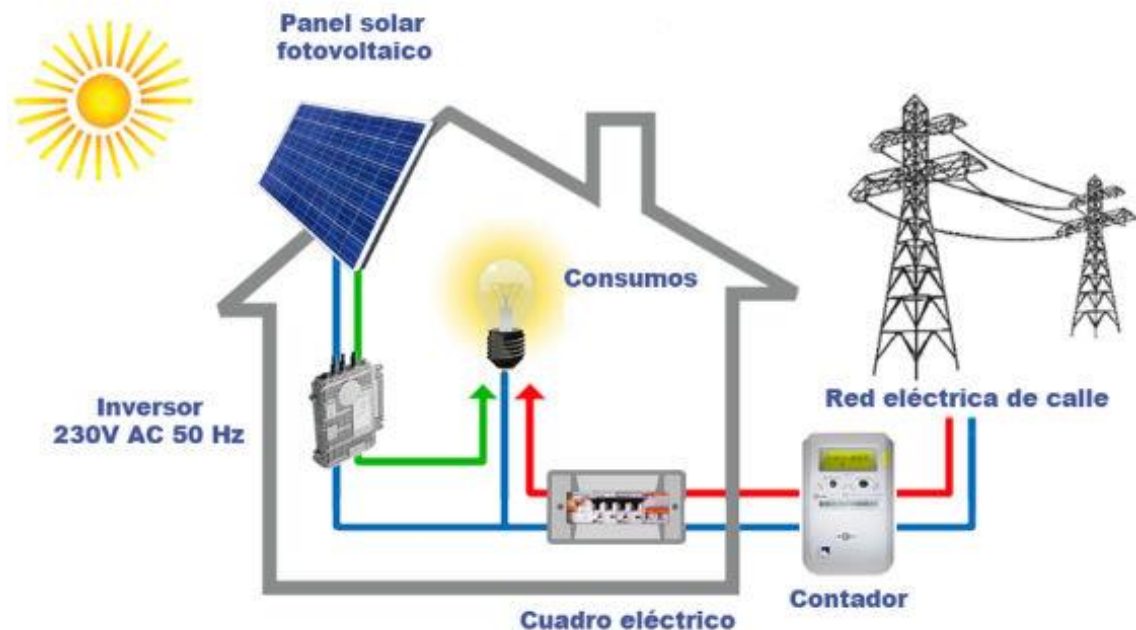


Figura 6.5 - Esquema de instalación con conexión a red

Fuente: <http://www.electricidadijzahinos.com/index.php/servicios/instalaciones-solares>

Normalmente, no se tienen baterías para almacenar energía, aunque con éstas, la corriente eléctrica que no se consume se podría almacenar o inyectar a la red.

La normativa española establece que, en una instalación con conexión a red, hay un impuesto por cada kWh generado por nuestras placas solares. Su argumento se basa en que aunque no se esté utilizando la red eléctrica, el usuario la tiene disponible como respaldo ante una posible necesidad.

En cambio, en un sistema sin conexión a red o autónomo, los paneles solares no están conectados a la red eléctrica y sirven para autoabastecer el lugar donde se instalan. Para satisfacer las necesidades energéticas solo se dispone de esa energía producida, lo que hace imprescindible que el número de placas y de baterías esté bien dimensionado.

En este tipo de sistema se requiere de una batería y de un regulador de potencia para almacenar la energía producida, ya que se hace imprescindible disponer de una serie de baterías para el almacenamiento de la energía para uso nocturno o en días con condiciones

climatológicas adversas.

En una instalación completamente aislada no hay ningún impuesto aplicable. La principal ventaja de este sistema autónomo es la libertad energética, ya que se elimina la dependencia de las compañías eléctricas, dejando atrás las subidas del precio de la electricidad en los meses de mayor demanda.

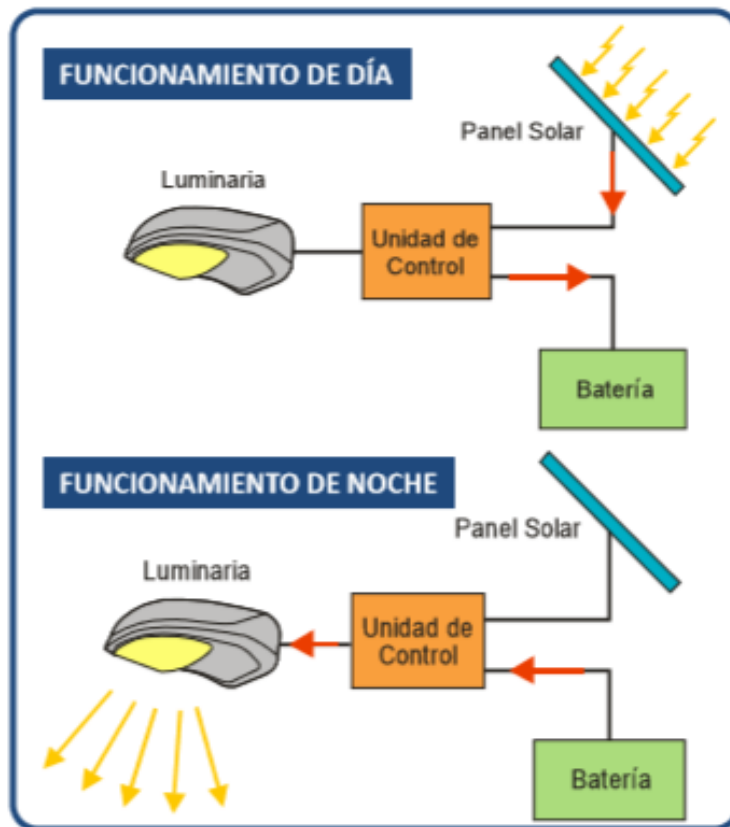


Figura 6.6 - Esquema de funcionamiento de un sistema autónomo

Fuente: <http://www.etisa.com>

En este proyecto, uno de los objetivos planteados es que el sistema sea autónomo. Su funcionamiento es sencillo. Durante el día se almacena la energía producida y se acumula en las baterías. En aquellas noches que sea necesaria la iluminación del circuito, la energía almacenada alimentaría al conjunto de focos del circuito.

Teóricamente, durante el día no se usará esta energía ya que el Sol se encargará de alumbrar el circuito, sin embargo, en días nublados se podría hacer necesario el uso de esta energía.

6.4. Componentes del sistema autónomo

En la figura 6.6 se presentan los elementos que forman parte de un sistema autónomo.

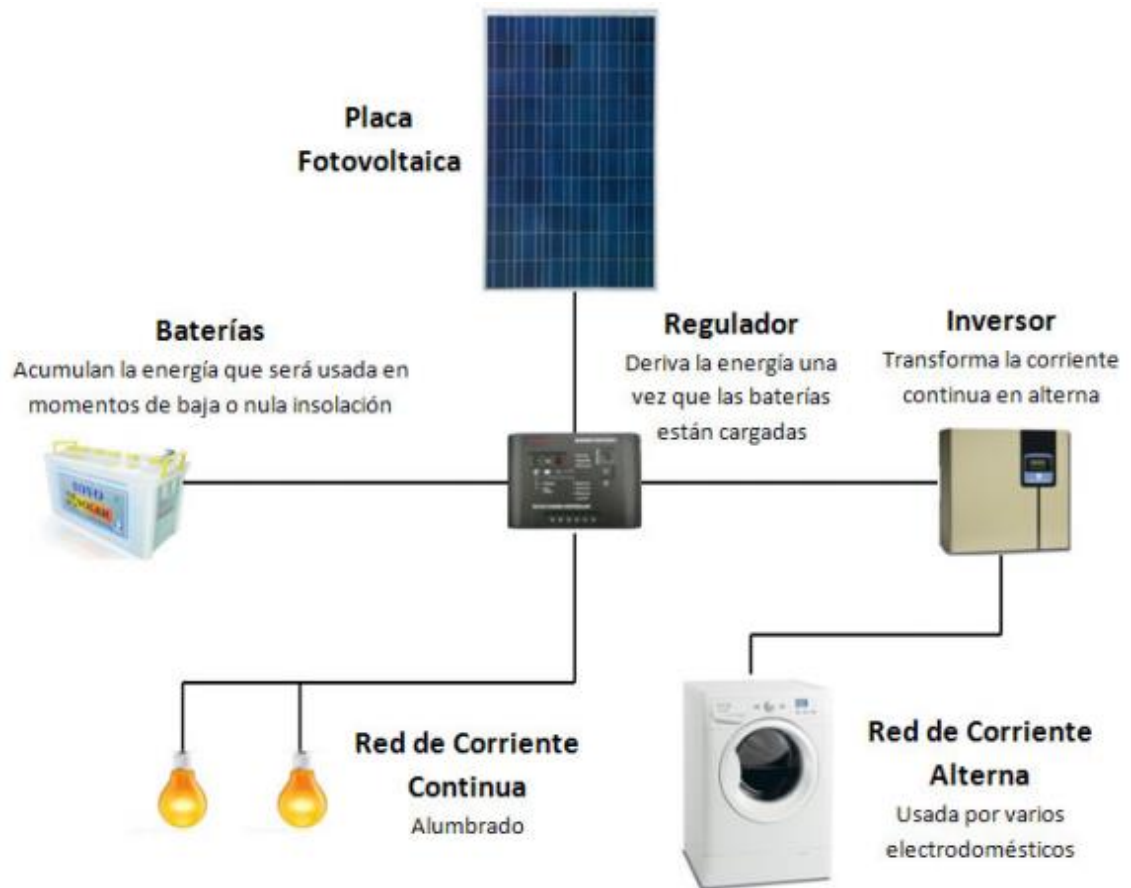


Figura 6.7 - Esquema de componentes de un sistema autónomo

Fuente: <http://www.grupodac.info>

Los componentes necesarios [19] y su descripción se presentan a continuación.

6.4.1. Placa fotovoltaica

Elemento encargado de la transformación de la luz solar en electricidad (corriente continua). Han de ser resistentes a los agentes atmosféricos como la nieve o el granizo. Tienen una garantía de 25 años.

El rendimiento de las placas va disminuyendo con el paso del tiempo. Existen diferentes tipos de placas en función del material utilizado en la construcción de las células fotovoltaicas. Cada tipo tiene un coste y una determinada eficiencia energética.

Se pueden distinguir 3 grandes grupos:

- Placa monocristalina.
El silicio fundido se solidifica formando un único cristal.
Presenta una estructura muy ordenada.
De color negro o azul oscuro.
Son las placas con mejor rendimiento pero tienen un sistema de producción más complejo y, por tanto, son más caras.
Rendimiento: 15-18%



Figura 6.8 - Placa monocristalina

Fuente: Wikipedia

- Placa policristalina.
Durante el enfriamiento del silicio en un molde se forman varios cristales.
Su estructura no es tan ordenada.
De color azul.
Rendimiento: 12-15%



Figura 6.9 - Placa policristalina

Fuente: Wikipedia

- Placa amorfa.
Su estructura es bastante desordenada.
De color marrón.
Son las más simples de fabricar, las más económicos pero tienen el menor rendimiento.
Rendimiento: 6-8%

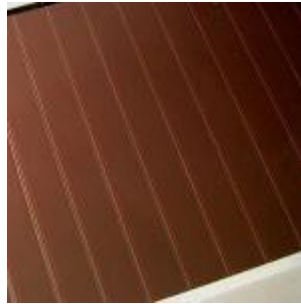


Figura 6.10 – Placa amorfa

Fuente: Wikipedia

6.4.2. Regulador de carga

La electricidad procedente de la placa solar llega a la batería pasando por el regulador de carga, que controla esta corriente. Este elemento protege de posibles cortocircuitos, sobrecargas y sobre descargas, facilitando que la batería dure más tiempo.

Además, cuando se necesita usar la energía de la batería, la corriente tiene que pasar nuevamente por el regulador de carga. También nos permite saber si la batería está cargada o descargada.

Desde el regulador de carga se pueden conectar directamente los dispositivos que precisen de corriente continua.

6.4.3. Batería

Elemento encargado del almacenamiento de la energía eléctrica producida por las placas solares. Posibilita el uso de la electricidad tanto por la noche como en días con poca insolación.

Tienen una garantía entre 7 y 10 años.

Se trata de un tipo de baterías específicas, ya que están sometidas a continuos ciclos de carga y descarga. Por este motivo, se hace imprescindible el uso de un buen regulador de carga para evitar el deterioro de la batería.

6.4.4. Inversor

Elemento encargado de la transformación de la corriente continua procedente del regulador de carga en corriente alterna para aquellos dispositivos que así lo precisen.

Normalmente, transforma 12 V de corriente continua en 220 V de corriente alterna, controlando la calidad y la uniformidad de la señal.

6.4.5. Cableado

Elemento encargado del enlace entre los componentes del sistema.

6.5. Configuración de las placas solares

Una decisión importante a tomar es la configuración de las placas solares. Disponemos de las siguientes opciones:

- Placas solares centralizadas.
Se trata de disponer de una granja de placas solares que suministre la energía producida a los focos distribuidos por todo el circuito.
- Placas solares distribuidas.
Se trata de disponer de placas solares independientes situadas en cada foco.

Aspectos a tener en cuenta en la granja de placas solares:

- Ventajas:
 - Fácil instalación.
 - El mantenimiento de las placas será muy sencillo ya que se encontrarán agrupadas en el suelo.
 - Las baterías estarán agrupadas y resguardadas en una pequeña construcción que las proteja de las condiciones meteorológicas adversas.
 - Cuando se tenga que proceder a la renovación, tanto placas como de baterías, ésta será muy simple.
 - Si con el transcurso de los años se decidiera cambiar los focos instalados o las farolas por otros, las placas no se verían afectadas en gran medida, ni tampoco dificultarían en el proceso de instalación. Lo único que habría que hacer sería redimensionar, aumentando o disminuyendo el número de placas existentes.
- Desventajas:
 - El coste de la obra para instalar una longitud de cable considerable por todo el circuito.

- Distribuir la electricidad a través de cables de gran longitud provoca una pérdida de rendimiento, con lo cual, se tendrá que calcular el porcentaje de pérdida y redimensionar el número de placas necesario para compensar este efecto.
- Reserva de una cantidad de terreno considerable para la instalación de la granja.



Figura 6.11 - Granja de placas solares

Fuente: <https://www.applesfera.com>

Aspectos a tener en cuenta en el uso de placas independientes:

- Ventajas:
 - Ahorro en cableado, ya que cada placa estará situada al lado del foco.
 - No hay que reservar terreno para la instalación de la granja.
- Desventajas:
 - La instalación de cada placa será más costosa, harán falta elevadores o grúas y un sistema de fijación de las placas al poste.
 - El mantenimiento será más costoso ya que se tendrán que revisar individualmente a lo largo del recorrido del circuito.
 - Cada placa tendrá que disponer de su propia batería, lo que elevará el coste del proyecto. Además, las baterías deben estar sujetas a estrictas condiciones de mantenimiento, lo cual hace que si no se pueden situar en el interior del poste, se tendrían que proteger mediante carcasas para salvaguardarlas de las inclemencias meteorológicas.



Figura 6.12 - Placa solar independiente

Fuente: <https://www.tecnologia.net/alumbrado-solar-y-farolas-solares/>

Una vez analizados los pros y contras de cada una de las opciones, se toma la decisión de instalar placas independientes.

Si bien, la instalación inicial de las placas en cada poste tendrá un mayor coste, se estima que éste será menor que el precio de tener que soterrar todos los cables a lo largo del trazado del circuito.

Además, en algunos tramos del circuito estos cables tendrían que pasar por debajo de la pista teniéndola que destruir parcialmente, lo que provocaría el típico efecto parche en la pista si no se volviera a reconstruir con precisión. Este efecto en una carretera convencional no tendría gran importancia pero en un circuito de carreras donde se pueden alcanzar velocidades muy elevadas podría afectar a la seguridad en la conducción.

Otra ventaja es la de poder efectuar estudios más sencillos para cada tipo de foco y potencia, extrapolándolos al resto.

También se ahorrarán costes en el cableado de todo el circuito, a lo cual hay que añadir el no sobredimensionamiento del número de placas debido a la pérdida de rendimiento derivada de la longitud de este cableado a lo largo del trazado del circuito.

Otro aspecto decisivo es que no hay que reservar terreno para la instalación de la granja, evitando tener que hacer obras de gran envergadura, tala de árboles o sacrificando alguna zona de parking en el complejo.

6.6. Parámetros solares

Para efectuar el estudio, deberemos conocer algunos parámetros específicos que dependerán de la localización donde se ha de proceder a la instalación de las placas.

Las coordenadas del Parcmotor Castellolí son: latitud $41,59^\circ$ y longitud $1,69^\circ$.



Figura 6.13 - Coordenadas del circuito

Fuente: Google Maps

Un parámetro fundamental es la **orientación** [20]. Para la obtención de la máxima insolación, se recomienda que las placas se orienten hacia el Ecuador. Por este motivo, en el hemisferio Norte se han de orientar hacia el Sur y en el hemisferio Sur se han de orientar hacia el Norte.

En muchas instalaciones estos criterios no se pueden seguir al pie de la letra y se colocan simplemente en el lado más apropiado del tejado de la casa.

En este estudio, al no disponer de estas restricciones, orientaremos las placas adecuadamente para maximizar la energía generada. Con la orientación óptima, el número de placas a instalar será menor.

En nuestro proyecto, como las placas no se han de colocar sobre un tejado, no será necesario efectuar un análisis estructural de la cubierta del edificio.

Otro parámetro importante a tener en cuenta es el **ángulo de inclinación** al que se deben colocar las placas, el cual depende de la latitud del lugar. Los rayos solares deben llegar al panel de la manera lo más perpendicular posible para optimizar al máximo la cantidad de energía generada.

Hay dos tipos de inclinación, la fija y la variable. La inclinación fija es aquella que se mantiene constante a lo largo del año. La inclinación variable es aquella que varía dependiendo de la época del año en la que estemos utilizando un motor.

En nuestro proyecto usaremos una inclinación fija ya que los costes son inferiores a los de la inclinación variable.

Por norma general, cuando un panel se mantiene con un ángulo fijo durante todo el año, el ángulo de instalación suele coincidir con la latitud del lugar, es decir, que en nuestro caso, un ángulo recomendado sería de unos 42 grados.

Como ejemplo orientativo, en la península ibérica se suele escoger una orientación Sur, con una inclinación de 40-45 grados según zonas.

Este ángulo propuesto de 42° es orientativo y no se suele seguir al pie de la letra. Es habitual instalar las placas a 45° o simplemente con la misma inclinación del tejado donde se instala.

Uno de los parámetros más importantes es la **radiación solar**.

Mediante PVGIS, un software online, se puede calcular la radiación recibida en una determinada localización.

Este programa también calcula el ángulo inclinado y acimutal óptimo para una localización concreta, a partir de sus coordenadas geográficas.

Estimación FV | Radiación mensual | Radiación diaria | FV autónomo

Rendimiento del sistema FV conectado a red

Base de datos de radiación: Climate-SAF PVGIS [\[¿Qué es esto?\]](#)

Tecnología FV: Silicio cristalino

Potencia FV pico instalada: 1 kWp

Pérdidas estimadas del sistema [0;100]: 14 %

Opciones de montaje fijo:

Posición de montaje: Posición libre

Inclin. [0;90]: 42 grados ☐ Optimizar la inclinación

Acimut [-180;180]: 0 grados ☒ Optimizar también el acimut
(Ángulo de acimut de -180 a 180. Este=-90, sur=0)

Opciones del sistema de seguimiento:

☐ Eje vertical Inclin. [0;90]: 0 grados ☐ Optimizar

☐ Eje inclinado Inclin. [0;90]: 0 grados ☐ Optimizar

☐ Seguidor solar a dos ejes

Fichero del horizonte: Seleccionar archivo Ningún archivo seleccionado

Formatos de salida

☒ Mostrar gráficas ☒ Mostrar el horizonte

☒ Página web ☐ Fichero de texto ☐ PDF

Calcular [\[ayuda\]](#)

Figura 6.14 - Aplicación PVGIS. Estimación de FV

Fuente: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=es&map=europe>

Para nuestra localización, los resultados obtenidos de índice de radiación solar por meses son:

| Sistema fijo: inclinación=36 grados, orientación=5 grados (óptimo) | | | | |
|--------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| Mes | Ed | Em | Hd | Hm |
| Ene | 2.79 | 86.6 | 3.51 | 109 |
| Feb | 3.66 | 103 | 4.62 | 129 |
| Mar | 4.53 | 140 | 5.87 | 182 |
| Abr | 4.34 | 130 | 5.75 | 173 |
| Mayo | 4.63 | 143 | 6.24 | 193 |
| Jun | 4.81 | 144 | 6.62 | 198 |
| Jul | 4.89 | 151 | 6.80 | 211 |
| Ago | 4.62 | 143 | 6.43 | 199 |
| Sep | 4.24 | 127 | 5.78 | 173 |
| Oct | 3.69 | 114 | 4.89 | 152 |
| Nov | 2.84 | 85.1 | 3.65 | 109 |
| Dic | 2.56 | 79.3 | 3.23 | 100 |
| Año | 3.97 | 121 | 5.29 | 161 |
| Total para el año | | 1450 | | 1930 |

Figura 6.15 - Resultados de radiación mensual

Fuente: propia

Dónde:

- Ed
Producción de electricidad media diaria por el sistema en kWh.
- Em
Producción de electricidad media mensual por el sistema en kWh.
- Hd
Media diaria de la irradiación global recibida por metro cuadrado por los módulos del sistema en kWh/m².
- Hm
Suma media de la irradiación global por metro cuadrado recibida por los módulos del sistema en kWh/m².

Para nuestro estudio, el valor de Hd es el de mayor utilidad para efectuar los cálculos.

Además de la tabla de resultados obtenida, el software PVGIS nos determina que el ángulo de inclinación óptimo es de 36° y el de orientación de 5° (siendo el Sur 0°).

Estos ángulos son los que utilizaremos para el estudio.

Por último, como usaremos placas independientes, no tendremos que efectuar el cálculo de la distancia entre placas según su inclinación para evitar que se hagan sombra entre ellas y se pierda rendimiento.

6.7. Estudio

Se realizarán los estudios específicos para los focos de 160 W, 220 W, 285 W, para las luces del túnel y para aquellos casos donde hay que situar más de un foco por poste, para analizar qué tipo de placa y qué tipo de batería es la idónea en cada caso.

Se usarán unas determinadas fórmulas [21] [22] para efectuar la estimación de los componentes necesarios en una instalación solar fotovoltaica. Para ello, tenemos que definir una serie de parámetros iniciales:

- Consumo total diario.
Se obtiene de multiplicar la potencia de la luminaria por las horas que se usará en un día.
Se establece un máximo de 6 horas de uso nocturno. Se trata de una estimación razonable ya que, tomando como referencia una carrera de Fórmula 1 suele durar entre unos 100 minutos hasta un máximo de 2 horas.
- Días de autonomía.
Este parámetro depende del uso que se le dé a la instalación. En nuestro caso, se establece una autonomía de 1 día.
Si el circuito se fuera a utilizar cada noche la autonomía debería ser mayor, pero como su uso será más esporádico, con un día ya es suficiente y además nos abarata el coste.
- Nº de días de uso.
Es el número de días que se usará cada semana. Para este caso en concreto, suponemos unos 3 días por semana (3/7), donde su uso será principalmente los fines de semana.
- Tensión del sistema.
Es la tensión a la que trabajará el conjunto de componentes (placas, baterías, etc.), que será de 24 V.
- Profundidad de descarga.
Depende del tipo de batería que se usa.
En baterías de gel o AGM es del 70%.
En baterías de plomo abierto es del 50%.
Usaremos las baterías AGM ya que son idóneas para instalaciones de tamaño medio, con lo cual, la profundidad de descarga se estima del 70%.
Este dato se puede consultar en las características técnicas de cada modelo y fabricante.
No necesitan mantenimiento y su vida útil puede llegar a los 10 años.
- Rendimiento de la instalación (η).
Suponemos un rendimiento del 0.7 ya que se tiene en cuenta un 30% de pérdidas debidas al panel, al inversor, a la batería, al regulador, así como pérdidas por suciedad y deterioro.

6.7.1. Paneles solares

La fórmula para estimar el número de paneles necesarios es la siguiente:

$$N^{\circ} \text{ paneles} = \frac{\text{Consumo} \left[W \cdot \frac{h}{\text{día}} \right] \cdot n^{\circ} \text{ días uso [días]}}{\text{HSP [h]} \cdot \eta \cdot \text{Potencia pico del panel [W]}}$$

Dónde:

- STC: irradiancia en condiciones estándar de medida (1 kW/m^2).
Es la radiación solar que se usa para calibrar las placas solares.
- HSP (horas solares pico).
Son las horas que tendría que brillar el Sol a una intensidad de 1 kW/m^2 para obtener la insolación total de un día. Se calcula a partir del mes con una menor irradiación media diaria, es decir, con menor H_d , que en nuestro caso es 3,23 en el mes de Diciembre. De esta manera, dimensionamos la instalación para las condiciones más desfavorables.

$$\text{HSP} = \frac{H_d}{\text{STC}} = \frac{3,23 \left[\frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \right]}{1 \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]} = 3,23 \text{ h}$$

Se tomará como referencia el catálogo de la página web de Autosolar [23] para efectuar este estudio.

6.7.1.1. Focos de 285 W

El consumo total diario de este foco es de: $285 \text{ W} \cdot 6 \text{ h/día} = 1.710 \text{ W} \cdot \text{h/día}$

Fijando la preferencia de uso de un solo panel, se obtiene:

$$N^{\circ} \text{ paneles} = \frac{1710 \left[W \cdot \frac{h}{\text{día}} \right] \cdot \frac{3}{7} [\text{días}]}{3,23 [\text{h}] \cdot 0,7 \cdot \text{Potencia del panel [W]}} \leq 1$$

$$\rightarrow \text{Potencia del panel [W]} \geq 324,13 \text{ W}$$

Para este tipo de foco, se usará **un panel de 325 W**.

6.7.1.2. Focos de 220 W

El consumo total diario de este foco es de: $220\text{W} \cdot 6\text{h/día} = 1.320 \text{ W} \cdot \text{h/día}$

Fijando la preferencia de uso de un solo panel, se obtiene:

$$N^{\circ} \text{ paneles} = \frac{1320 \left[\text{W} \cdot \frac{\text{h}}{\text{día}} \right] \cdot \frac{3}{7} [\text{días}]}{3,23 [\text{h}] \cdot 0,7 \cdot \text{Potencia del panel [W]}} \leq 1$$

$$\rightarrow \text{Potencia del panel [W]} \geq 250,2 \text{ W}$$

Para este tipo de foco, se usará **un panel de 300 W**.

6.7.1.3. Focos de 160W

El consumo total diario de este foco es de: $160\text{W} \cdot 6\text{h/día} = 960 \text{ W} \cdot \text{h/día}$

Fijando la preferencia de uso de un solo panel, se obtiene:

$$N^{\circ} \text{ paneles} = \frac{960 \left[\text{W} \cdot \frac{\text{h}}{\text{día}} \right] \cdot \frac{3}{7} [\text{días}]}{3,23 [\text{h}] \cdot 0,7 \cdot \text{Potencia del panel [W]}} \leq 1$$

$$\rightarrow \text{Potencia del panel [W]} \geq 181,96 \text{ W}$$

Para este tipo de foco, se usará **un panel de 200 W**.

6.7.1.4. Recta principal (tramo de boxes)

Tenemos 2 focos de 220 W en cada poste.

El consumo total diario es de: $2 \cdot 220\text{W} \cdot 6\text{h/día} = 2.640 \text{ W} \cdot \text{h/día}$

Usando paneles de 300 W:

$$N^{\circ} \text{ paneles} = \frac{2640 \left[W \cdot \frac{h}{\text{día}} \right] \cdot \frac{3}{7} [\text{días}]}{3,23 [h] \cdot 0,7 \cdot 300 [W]} = 1,67 \rightarrow 2 \text{ paneles}$$

En este caso, se usarán **2 paneles de 300 W**.

6.7.1.5. Curva 1

Tenemos 3 focos de 285 W en el mismo poste.

El consumo total diario es de: $3 \cdot 285 W \cdot 6 h / \text{día} = 5.130 W \cdot h / \text{día}$

Usando paneles de 325 W:

$$N^{\circ} \text{ paneles} = \frac{5130 \left[W \cdot \frac{h}{\text{día}} \right] \cdot \frac{3}{7} [\text{días}]}{3,23 [h] \cdot 0,7 \cdot 325 [W]} = 2,99 \rightarrow 3 \text{ paneles}$$

En este caso, se usarán **3 paneles de 325 W**.

6.7.1.6. Luminarias del túnel

Todas las luminarias que iluminan al túnel se conectarán y alimentarán del mismo grupo de paneles y baterías.

El consumo total diario es de: $108 W \cdot 18 \text{ unidades} \cdot 6 h / \text{día} = 11.664 W \cdot h / \text{día}$

Como se trata de un consumo elevado, cada una de las dos filas de luminarias se alimentará de forma independiente.

El consumo total diario de cada fila es de: $108 W \cdot 9 \text{ unidades} \cdot 6 h / \text{día} = 5.832 W \cdot h / \text{día}$

Usando paneles de 300 W:

$$N^{\circ} \text{ paneles} = \frac{5.832 \left[W \cdot \frac{h}{\text{día}} \right] \cdot \frac{3}{7} [\text{días}]}{3,23 [h] \cdot 0,7 \cdot 300 [W]} = 3,68 \rightarrow 4 \text{ paneles}$$

En este caso, se usarán 4 paneles de 300 W por fila, en total, **8 paneles de 300 W.**

6.7.1.7. Curva 4

Tenemos 2 focos de 285 W y uno de 220 W en el mismo poste.

El consumo total diario es de: $(2 \cdot 285W + 220W) \cdot 6h/día = 4.740 \text{ W} \cdot h/día$

Aunque su consumo es inferior al de la curva 1, también se alimentará cada foco de manera independiente.

En este caso, se usarán **2 paneles de 325 W y un panel de 300 W.**

6.7.1.8. Curva 11

Tenemos 2 focos de 285 W en el mismo poste.

El consumo total diario es de: $2 \cdot 285W \cdot 6h/día = 3.420 \text{ W} \cdot h/día$

Aunque su consumo es inferior al de la curva 1, también se alimentará cada foco de manera independiente.

En este caso, se usarán **2 paneles de 325 W.**

6.7.2. Capacidad de las baterías

Para el cálculo de la capacidad de las baterías, son necesarios los siguientes parámetros:

- Consumo total diario.
Depende de cada caso.
- Días de autonomía.
Se ha optado por disponer de una autonomía de 1 día. Aunque puede parecer ajustado, se considera suficiente debido a la climatología donde se ejecuta este proyecto. Además, hay que tener presente que incluso en los días nublados las placas solares reciben fotones que permiten seguir obteniendo energía solar. Sin embargo, en caso de que finalmente se demandara más autonomía, simplemente se tendría que multiplicar por los días de autonomía requeridos en la fórmula utilizada para el cálculo de capacidades.
- Profundidad de descarga.
70%
- Tensión de la batería.
24 V
- Pérdidas por temperatura y rendimiento.
15%

La fórmula para estimar la capacidad de la batería (A·h) necesaria es la siguiente:

$$\text{Capacidad batería} = \frac{\text{Consumo} \left[\frac{\text{Wh}}{\text{día}} \right] \cdot \text{n}^{\circ} \text{ días autonomía [días]}}{\text{Profundidad descarga} \cdot \text{Tensión batería [V]}} \cdot (1 + \% \text{pérd.})$$

Una vez calculada la capacidad mínima necesaria en cada caso, se seleccionará la batería o grupos de baterías que más se ajusten, teniendo en cuenta que deberán trabajar a 24 V.

Las baterías seleccionadas son las que parecen más adecuadas en el momento del presente estudio. En caso de ejecución del proyecto, se debería de revisar si ha salido al mercado otra mejor opción de compra.

6.7.2.1. Focos de 285 W

El consumo total diario de este foco es de: 1.710 W·h/día

$$\text{Capacidad batería} = \frac{1710 \left[\frac{\text{Wh}}{\text{día}} \right] \cdot 1 [\text{día}]}{0,7 \cdot 24 [\text{V}]} \cdot (1 + 0,15) \geq 117,05 \text{ Ah}$$

Para este tipo de foco, se usará **una batería de 120 Ah a 24 V.**

6.7.2.2. Focos de 220 W

El consumo total diario de este foco es de: 1.320 W·h/día

$$\text{Capacidad batería} = \frac{1320 \left[\frac{\text{Wh}}{\text{día}} \right] \cdot 1 [\text{día}]}{0,7 \cdot 24 [\text{V}]} \cdot (1 + 0,15) \geq 90,36 \text{ Ah}$$

Para este tipo de foco, se usará **una batería de 120 Ah a 24 V.**

6.7.2.3. Focos de 160 W

El consumo total diario de este foco es de: 960 W·h/día

$$\text{Capacidad batería} = \frac{960 \left[\frac{\text{Wh}}{\text{día}} \right] \cdot 1 [\text{día}]}{0,7 \cdot 24 [\text{V}]} \cdot (1 + 0,15) \geq 65,71 \text{ Ah}$$

Para este tipo de foco, se usará **una batería de 120 Ah a 24 V**.

Aunque esté sobredimensionado, esta opción es más económica que usar 2 baterías de 66 Ah a 12 V en serie.

6.7.2.4. Recta principal (tramo de boxes)

El consumo total diario es de: 2.640 W·h/día

$$\text{Capacidad batería} = \frac{2640 \left[\frac{\text{Wh}}{\text{día}} \right] \cdot 1 [\text{día}]}{0,7 \cdot 24 [\text{V}]} \cdot (1 + 0,15) \geq 180,71 \text{ Ah}$$

En este caso, se usará **una batería de 230 Ah a 24 V**.

6.7.2.5. Curva 1

El consumo total diario es de: 5.130 W·h/día

$$\text{Capacidad batería} = \frac{5130 \left[\frac{\text{Wh}}{\text{día}} \right] \cdot 1 [\text{día}]}{0,7 \cdot 24 [\text{V}]} \cdot (1 + 0,15) \geq 351,16 \text{ Ah}$$

Se debería de usar una batería de 440 Ah a 24 V. El problema es que esta batería resulta muy cara, por ello se decide que cada foco se alimentará de manera independiente, usando una batería de 120 Ah a 24 V.

En este caso, se usarán **3 baterías de 120 Ah a 24 V**.

6.7.2.6. Luminarias del túnel

El consumo total diario es de: 5.832 W·h/día

$$\text{Capacidad batería} = \frac{5832 \left[\frac{\text{Wh}}{\text{día}} \right] \cdot 1 [\text{día}]}{0,7 \cdot 24 [\text{V}]} \cdot (1 + 0,15) \geq 399,21 \text{ Ah}$$

Se debería de usar una batería de 440 Ah a 24 V. El problema es que esta batería resulta muy cara, por ello se decide que cada fila se separe en dos partes.

Por lo tanto, habrán 4 bloques en las luminarias del túnel, 2 en cada fila que se alimentarán

de manera independiente, usando una batería de 230 Ah a 24 V.

En este caso, se usarán **4 baterías de 230 Ah a 24 V**.

6.7.2.7. Curva 4

El consumo total diario es de: 4.740 W·h/día

$$\text{Capacidad batería} = \frac{4740 \left[\frac{\text{Wh}}{\text{día}} \right] \cdot 1 [\text{día}]}{0,7 \cdot 24 [\text{V}]} \cdot (1 + 0,15) \geq 324,46 \text{ Ah}$$

Se debería de usar una batería de 440 Ah a 24 V. El problema es que esta batería resulta muy cara, por ello se decide que cada foco se alimentará de manera independiente, usando una batería de 120 Ah a 24 V.

En este caso, se usarán **3 baterías de 120 Ah a 24 V**.

6.7.2.8. Curva 11

El consumo total diario es de: 3.420 W·h/día

$$\text{Capacidad batería} = \frac{3420 \left[\frac{\text{Wh}}{\text{día}} \right] \cdot 1 [\text{día}]}{0,7 \cdot 24 [\text{V}]} \cdot (1 + 0,15) \geq 234,11 \text{ Ah}$$

Se debería de usar una batería de 440 Ah a 24 V. El problema es que esta batería resulta muy cara, por ello se decide que cada foco se alimentará de manera independiente, usando una batería de 120 Ah a 24 V.

En este caso, se usarán **2 baterías de 120 Ah a 24 V**.

6.7.3. Inversores y reguladores de carga

Se dispondrá de un inversor y de un regulador de carga para el conjunto placa-batería-foco.

El inversor depende de la potencia de cada sistema. La potencia pico es la cantidad de kW instalados, mientras que la potencia nominal se refiere a la potencia del inversor.

No se puede producir más de lo que el inversor puede convertir. Por este motivo, en las instalaciones fotovoltaicas se suele instalar una potencia de pico superior a la nominal para poder cubrir el 100% de la capacidad del inversor.

En nuestro caso, sobredimensionaremos ligeramente la potencia del inversor.

Los reguladores de carga se suelen seleccionar a partir de la corriente máxima que pueden soportar, por eso es importante revisar en la hoja de características de los componentes a usar cual será la corriente panel-batería y la corriente de batería-inversor.

6.8. Disposición de las placas y resto de componentes

Al optar por un sistema de placas independientes, no se ha de efectuar el cálculo de la cantidad de terreno a reservar para la instalación de las placas fotovoltaicas ni buscar una ubicación dentro del complejo Parcmotor Castellolí.

Sin embargo, aparece la problemática de decidir dónde y cómo situar las placas solares.

Se optará por una idea simple pero efectiva. Mediante un sistema de fijación, cada placa estará situada en la parte superior del poste, evitando así sombras del foco o del propio poste y una pérdida de rendimiento.



Figura 6.16 - Sistema: Poste + Foco + Placa solar + Caja batería

Fuente: <http://www.brasil leds.com.br/luminaria-led-fotovoltaica/>

Las baterías y el resto de componentes estarán en el interior de unas cajitas que las protegerán de las condiciones meteorológicas, garantizando así una mayor duración.

Las placas se pueden situar tanto en la parte superior como inferior del poste.

La ventaja de situarlas en la parte superior es que resguardan de la lluvia a modo de paraguas y en días muy soleados, reguardan del sol a modo de parasol, evitando sobrecalentamientos. Además, se usa menos cableado.

Por el contrario, la ventaja de situarlas en la parte inferior facilita su instalación y mantenimiento y más viable para baterías grandes.

En aquellos casos particulares donde haya más de una placa por poste, como sucede en algunas curvas, se podrán disponer las placas en el suelo, teniendo presente las sombras.

Las placas y las baterías de las luminarias del túnel se situarán cerca de éstas, dispuestas en la parte del terreno que se considere más oportuna.

En el tramo de boxes de la recta principal, el instalador de las placas determinará si es posible situar dos placas en cada poste o es mejor situarlas agrupadas, por ejemplo, en el tejado de boxes.

6.9. Mantenimiento y seguridad de la instalación

Las instalaciones fotovoltaicas necesitan un mantenimiento [25] mínimo y sencillo.

Las placas simplemente se limpiarán con un trapo cuando estén sucias.

La batería es el elemento de la instalación que requiere una mayor atención y, de este buen mantenimiento, dependerá su vida útil. Tendrán que estar bien ventiladas y libres de polvo.

Por lo que respecta a la seguridad eléctrica, el instalador se encargará de hacer la toma pertinente en cada poste para asegurar una buena protección. También se colocará señalización alertando de riesgo de electrocución.

7. Sistema de control

En este capítulo se analizará cómo efectuar el control remoto de los focos.

No tendría sentido instalar placas solares independientes para eliminar la problemática del cableado a lo largo del trazado del circuito para luego tener que usar cableado para controlar el encendido/apagado de los focos. Para ello, se presentará la posibilidad del control remoto de los focos sin uso de cables.

Aunque existen otras alternativas disponibles, parece adecuado utilizar la red SIGFOX [26], muy de actualidad en las denominadas Smart Cities.

7.1. Red SIGFOX

Para efectuar el control remoto de los focos, una opción muy interesante sería mediante IoT, en concreto, con una red SIGFOX que surge como alternativa al actual LoRa, para tratar de resolver los problemas que presenta como reducir el coste al máximo y disminuir el coste de energía.

Esta red está inspirada en las comunicaciones que tenían los submarinos en la 2ª guerra Mundial, que podían enviar mensajes cortos por todo el mundo usando transmisiones bidireccionales a baja potencia.

Una de las características de la red SIGFOX es que es de baja potencia y largo alcance. Se pueden transmitir mensajes de 12 bytes, llegando a 140 mensajes al día, que es una cantidad más que suficiente para nuestro proyecto. También se caracteriza por usar frecuencias libres (ISM) resistentes a interferencias.

Debido a esta mayor eficiencia, las baterías que incorporan pueden llegar hasta los 15 años de vida. Los dispositivos se encuentran en reposo la mayor parte del tiempo y solo se “activan” cuando han de transmitir información.

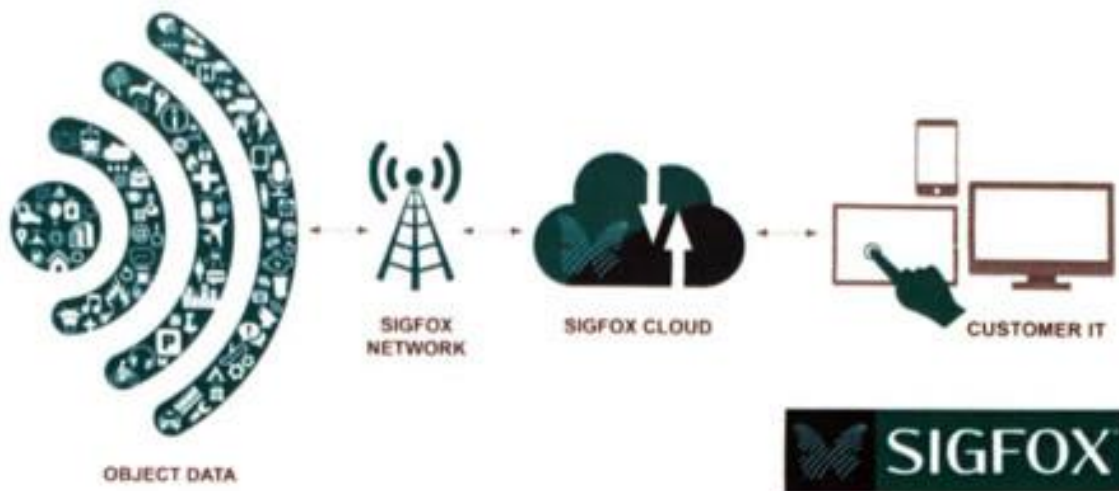


Figura 7.1 - Arquitectura de la red SIGFOX

Fuente: <https://www.xatakamovil.com/conectividad/la-conectividad-segun-sigfox-los-objetos-no-necesitan-bandas-anchas-sino-pequenos-mensajes>

Además, permite una conectividad bidireccional (UNB) y se controlan todos los dispositivos conectados a la red de forma centralizada, de una manera relativamente fácil de usar y de gestionar, permitiendo una amplia conectividad de objetos.

Para conectarse a esta red independiente es necesario disponer de un chip que, entre otras características, incorpora un sistema de localización.

8. Estudio económico

En este capítulo se efectuará el estudio económico del proyecto. Primero, se empezará con el desglose de las partidas de que consta el presupuesto. Una vez conocida la inversión necesaria, se realizará el análisis de su viabilidad económica.

8.1. Presupuesto

A continuación, se presentan las partidas de que consta el presupuesto del proyecto.

8.1.1. Sistema de iluminación

Por lo que respecta a los focos:

| Concepto | Coste/unidad | Unidades | Coste |
|---------------------|--------------|----------|-----------|
| Foco 160 W | 1.173 € | 79 | 92.667 € |
| Foco 220 W | 1.240 € | 84 | 104.160 € |
| Foco 285 W | 1.300 € | 69 | 89.700 € |
| Foco 108 W | 486 € | 18 | 8.748 € |
| Coste total | | | 295.275 € |
| Descuento comercial | | 15% | 44.291 € |
| Coste final | | | 250.984 € |

Tabla 8.1 - Presupuesto focos

Fuente: propia

Estas tarifas, con IVA ya incluido, son las que aparecen en la página web de Philips [23]. Por la compra al por mayor suponemos un descuento comercial del 15%.

Por lo que respecta a los postes:

| Concepto | Coste/unidad | Unidades | Coste |
|---------------------|--------------|----------|----------|
| Poste | 400 € | 216 | 86.400 € |
| Coste total | | | 86.400 € |
| Descuento comercial | | 15% | 12.960 € |
| Coste final | | | 73.440 € |

Tabla 8.2 - Presupuesto postes

Fuente: propia

Estas tarifas, con IVA ya incluido, tienen en cuenta los sistemas de sujeción necesarios. Por la compra al por mayor suponemos un descuento comercial del 15%.

En resumen, el coste total del sistema de iluminación es de:

| Concepto | Coste |
|-------------|-----------|
| Focos | 250.984 € |
| Postes | 73.440 € |
| Coste total | 324.424 € |

Tabla 8.3 - Presupuesto sistema de iluminación

Fuente: propia

8.1.2. Sistema de placas solares

Por lo que respecta a la instalación solar, donde se incluyen las placas solares, baterías, cajas de protección, inversores y reguladores de carga:

| Concepto | Placas | Placas C./unidad | Baterías | Baterías C./unidad | Invers. Regul. | Nº | Coste |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|-----|-------------|
| 285 W | 325 W | 265,70 € | 120 Ah 24 V | 420,26 € | 320,00 € | 62 | 62.369,52 € |
| 220 W | 300 W | 258,49 € | 120 Ah 24 V | 420,26 € | 320,00 € | 59 | 58.926,25 € |
| 160 W | 200 W | 180,65 € | 120 Ah 24 V | 420,26 € | 320,00 € | 79 | 72.751,89 € |
| Boxes (2 x 220 W) | 2 x 300 W | 516,98 € | 230 Ah 24 V | 810,89 € | 320,00 € | 12 | 19.774,44 € |
| Curva 1 (3 x 285 W) | 3 x 325 W | 797,10 € | 3 x 120 Ah 24 V | 1.260,78 € | 320,00 € | 1 | 2.377,88 € |
| Túnel (18 x 108 W) | 8 x 300 W | 2.067,92 € | 4 x 230 Ah 24 V | 3.243,56 € | 320,00 € | 1 | 5.631,48 € |
| Curva 4 (2 x 285 W + 220 W) | 2 x 325 W + 1 x 300 W | 789,89 € | 3 x 120 Ah 24 V | 1.260,78 € | 320,00 € | 1 | 2.370,67 € |
| Curva 11 (2 x 285 W) | 2 x 325 W | 531,40 € | 2 x 120 Ah 24 V | 840,52 € | 320,00 € | 1 | 1.691,92 € |
| Coste total | | | | | | | 225.894 € |
| Descuento comercial | | | | | | 15% | 33.884 € |
| Coste final | | | | | | | 192.010 € |

Tabla 8.4 - Presupuesto sistema de placas solares

Fuente: propia

Estas tarifas, con IVA ya incluido, son las que aparecen en la página web de Autosolar [24]. Por la compra al por mayor suponemos un descuento comercial del 15%.

8.1.3. Cableado

Por lo que respecta al cableado:

| Concepto | Coste/m | Nº metros/foco | Nº focos | Coste |
|--------------------------------------|---------|----------------|----------|---------|
| Cableado sección 2,5 mm ² | 0,48 € | 24 | 232 | 2.673 € |
| Coste total | | | | 2.673 € |

Tabla 8.5 - Presupuesto cableado

Fuente: propia

8.1.4. Sistema de control

Por lo que respecta al sistema de control remoto de los focos, la previsión de costes es de 4.500 €.

8.1.5. Coste laboral

Por lo que respecta a la mano de obra, consta de un ingeniero que llevará la dirección del proyecto y a 4 instaladores. El tiempo estimado de duración del proyecto es de 4 meses.

| Concepto | Coste/mes | Nº personas | Nº meses | Coste |
|------------------------|-----------|-------------|----------|----------|
| Redacción del proyecto | | | | 6.000 € |
| Coste laboral | 3.300 € | 5 | 4 | 66.000 € |
| Coste total | | | | 72.000 € |

Tabla 8.6 - Presupuesto coste laboral

Fuente: propia

8.1.6. Presupuesto final

Teniendo en cuenta las partidas anteriores, el presupuesto final es de:

| Concepto | Coste |
|---------------------------|------------------|
| Sistema de iluminación | 324.424 € |
| Sistema de placas solares | 192.010 € |
| Cableado | 2.673 € |
| Sistema de control | 4.500 € |
| Coste laboral | 72.000 € |
| Presupuesto final | 595.607 € |

Tabla 8.7 - Presupuesto final

Fuente: propia

8.2. Inversión

Para la estimación de ingresos se tomará como referencia el circuito de Montmeló [27]. Su accionista principal es la Generalitat de Catalunya que, mediante financiación pública, aporta una gran parte de la inversión necesaria para el buen funcionamiento del circuito. Desde hace unos 10 años el circuito es económicamente deficitario. Entre los años 2006 y 2017, tanto la Generalitat como el Ayuntamiento de Barcelona, han aportado más de 102 millones de euros.

A pesar de esta gran inversión, se ha demostrado que sus beneficios a nivel de país compensan ya que, por ejemplo, aportan unos 40 millones de euros en impuestos, crean unos 10.000 puestos de trabajo temporales durante el campeonato de Fórmula 1 y unos 50 puestos de trabajo fijos.

Después de analizar los costes, se prevé que la inversión inicial necesaria para emprender el proyecto sea de 595.607 euros.

Este capital puede ser invertido por sus actuales accionistas o, como en el caso anterior, por la Generalitat para ayudar a financiar el proyecto y así convertirse en un circuito referencia por sus características y por su idónea ubicación al estar muy próximo a Barcelona, pudiendo acoger grandes eventos del mundo del motor y ayudando, al igual que el circuito de Montmeló aunque de momento a menor escala, a generar beneficios sociales y económicos.

Además, la posibilidad de organizar eventos nocturnos para vehículos de bajo impacto

sonoro prevé un aumento de los usuarios amantes del pilotaje nocturno pero haciéndolo de manera legal.

Se hace una mención especial a que Igualada es candidata a ser la Ciudad Europea del deporte 2019, donde el circuito de Castellolí tiene un gran peso en esta candidatura [28]. En caso de resultar la ciudad ganadora implicaría su mayor visibilidad internacional, lo que a la larga conllevaría la celebración de un mayor número de eventos y, por tanto, un mayor nivel de ingresos.

8.3. Viabilidad económica

La viabilidad económica del circuito depende de muchos factores: un buen marketing que posicione el circuito de Castellolí, que los gestores del circuito lleguen a buenos acuerdos y sepan atraer grandes eventos, etc.

Es muy complicado que el circuito de Castellolí pudiera acoger un campeonato de Fórmula 1 o motociclismo ya que el circuito de referencia de Catalunya es el circuito de Montmeló. Además, no se trata de competir con Montmeló sino de complementarse. Por ello, es importante saber el sector de mercado donde orientarse y uno con buenas perspectivas de futuro sería el de las carreras con automóviles eléctricos, por ejemplo, la *Fórmula E*, donde Castellolí tendría un plus para acoger este tipo de eventos al ser un circuito verde y sostenible.

Para el cálculo de la viabilidad económica del proyecto se tomaran varias hipótesis:

- Nuevos contratos publicitarios.
- Pilotaje nocturno.
- A partir del tercer año, consecución de nuevos eventos.
- Se generarán dos puestos de trabajo fijos para atender a las nuevas necesidades y efectuar tareas de mantenimiento de la iluminación y de la instalación solar.
- Se estima un coste de mantenimiento de 5.000 € anuales, a partir del primer año de instalación.
- Se supone un tipo de interés anual fijo del 10%.

| Año | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| Inversión | 595.607 € | | | | | |
| Salarios | | 48.000 € | 48.000 € | 48.000 € | 48.000 € | 48.000 € |
| Mantenimiento | | 5.000 € | 5.000 € | 5.000 € | 5.000 € | 5.000 € |
| Ingresos | | 50.000 € | 75.000 € | 400.000 € | 400.000 € | 400.000 € |
| | | | | | | |
| Total pagos | 595.607 € | 53.000 € | 53.000 € | 53.000 € | 53.000 € | 53.000 € |
| Ingresos netos | -595.607 € | -3.000 € | 22.000 € | 347.000 € | 347.000 € | 347.000 € |
| Flujo | -595.607 € | -598.607 € | -576.607 € | -229.607 € | 117.393 € | 464.393 € |
| Flujo actualizado | -595.607 € | -544.188 € | -476.535 € | -172.507 € | 80.181 € | 288.352 € |

| Año | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Inversión | | | | | |
| Salarios | 48.000 € | 48.000 € | 48.000 € | 48.000 € | 48.000 € |
| Mantenimiento | 5.000 € | 5.000 € | 5.000 € | 5.000 € | 5.000 € |
| Ingresos | 400.000 € | 400.000 € | 400.000 € | 400.000 € | 400.000 € |
| | | | | | |
| Total pagos | 53.000 € | 53.000 € | 53.000 € | 53.000 € | 53.000 € |
| Ingresos netos | 347.000 € | 347.000 € | 347.000 € | 347.000 € | 347.000 € |
| Flujo | 811.393 € | 1.158.393 € | 1.505.393 € | 1.852.393 € | 2.199.393 € |
| Flujo actualizado | 458.010 € | 594.439 € | 702.277 € | 785.595 € | 847.961 € |

Tabla 8.8 - Balance de viabilidad económica

Fuente: propia

A continuación, se procede al cálculo del VAN y el TIR:

| | |
|---------------|-------------|
| VAN | 1.967.978 € |
| TIR (5 años) | 16% |
| TIR (10 años) | 31% |

Tabla 8.9 - VAN y TIR

Fuente: propia

Como el VAN es positivo y el TIR es superior al tipo de interés de referencia [29][30] el proyecto sería viable económicamente.

El periodo de recuperación de la inversión sería el 4º año.

9. Planificación

En este capítulo se presenta la planificación de las actividades del proyecto.

9.1. Diagrama de Gantt

La planificación de cada una de las actividades del proyecto se presenta mediante un diagrama de Gantt. Este tipo de diagrama se utiliza para planificar las tareas de que consta un proyecto, permitiendo tener una visión global del calendario, así como la prioridad y duración de cada una de las actividades contempladas en el proyecto. También permite efectuar el seguimiento y control de cada una de las actividades y, de esta manera, detectar posibles desfases en el proyecto.

| Tarea | S E M A N A S | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Redacción del proyecto | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | |
| Desarrollo SIGFOX | | | | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | |
| Test de funcionalidad | | | | | | | ■ | | | | | | | | | |
| Instalación | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Test final de proyecto | | | | | | | | | | | | | | | | ■ |

Tabla 9.1 - Diagrama de Gantt

Fuente: propia

En la tarea “Redacción del proyecto”, el director del proyecto, partiendo del estudio efectuado en el presente documento, procede a su análisis, efectuando las adaptaciones necesarias.

En la tarea “Desarrollo SIGFOX”, se implementa el software necesario para la gestión remota de la iluminación del circuito.

En la tarea “Test de funcionalidad”, se efectúan las pruebas iniciales para la verificación de la correcta funcionalidad del proyecto.

En la tarea “Instalación”, se efectúa la instalación de los postes, los focos, las placas solares, las baterías y el sistema de control.

En la tarea “Test final de proyecto”, se efectúan las pruebas para la verificación de la correcta funcionalidad del proyecto completo.

El plazo previsto para la ejecución y puesta en servicio del proyecto es de 4 meses.

10. Normativa

Un aspecto fundamental para la correcta ejecución de un proyecto es el cumplimiento de la normativa. En este capítulo se revisa la normativa aplicable al presente proyecto.

Uno de los motivos para la utilización de fabricantes como Philips o Autosolar es la garantía de que diseñan sus productos para que éstos cumplan con la normativa vigente de cada país.

A continuación, se analiza la normativa sobre iluminación y la normativa sobre la energía solar fotovoltaica en su modalidad de autoconsumo.

10.1. Normativa sobre iluminación

Aunque la iluminación parezca un tema secundario, es de vital importancia y sus niveles recomendados están sujetos a una serie de normativas y reglamentos [31].

Para la iluminación exterior, se debe cumplir con la norma UNE-EN 13201:2009 y para satisfacer el R.D. 1890/2008 no se puede superar en un 20% los niveles recomendados en este documento.

Para el estudio técnico de luminosidad se tomó como referencia la normativa de iluminación en autopistas/autovías con clase ME1, la clase que exige una mayor luminosidad.

La normativa también evalúa el deslumbramiento en la iluminación de recintos abiertos dedicados al deporte, con un índice $GR_{m\acute{a}x} = 50$.

| Clase de Alumbrado | Luminancia de la superficie de la calzada en condiciones secas | | | Deslumbramiento Perturbador | Iluminación de alrededores |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| | Luminancia ⁽⁴⁾ Media L_m (cd/m ²) ⁽¹⁾ | Uniformidad Global U_o [mínima] | Uniformidad Longitudinal U_{\square} [mínima] | Incremento Umbral TI (%) ⁽²⁾ [máximo] | Relación Entorno SR ⁽³⁾ [mínima] |
| ME1 | 2,00 | 0,40 | 0,70 | 10 | 0,50 |
| ME2 | 1,50 | 0,40 | 0,70 | 10 | 0,50 |
| ME3a | 1,00 | 0,40 | 0,70 | 15 | 0,50 |
| ME3b | 1,00 | 0,40 | 0,60 | 15 | 0,50 |
| ME3c | 1,00 | 0,40 | 0,50 | 15 | 0,50 |
| ME4a | 0,75 | 0,40 | 0,60 | 15 | 0,50 |
| ME4b | 0,75 | 0,40 | 0,50 | 15 | 0,50 |
| ME5 | 0,50 | 0,35 | 0,40 | 15 | 0,50 |
| ME6 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 15 | Sin requisitos |

Figura 10.1 - Series ME de clase de alumbrado para viales secos tipos A y B
Fuente: Instrucción Técnica Complementaria EA – 02. Niveles de iluminación (R.D. 1890/2008)

http://www.f2i2.net/documentos/lsi/REEAE/ITC-EA-02%20Guia_E_may2013_R1.1.pdf

Estos requisitos son los que se tomaron como referencia para la simulación con el software DIALux.

10.2. Normativa fotovoltaica para autoconsumo

En la actualidad, el R.D. 900/2015 es el que regula la normativa de la producción de energía solar en el estado español. Este Real Decreto impone una serie de condiciones técnicas, administrativas y económicas que solo deben tenerse en cuenta para instalaciones con conexión a la red [32].

Se considera que una instalación es aislada cuando no interviene en ningún punto la red eléctrica.

En el caso del presente proyecto, el circuito de Castellolí puede mantener el actual contrato con su compañía eléctrica sin cargos económicos adicionales ya que la iluminación del circuito se efectúa mediante una instalación aislada y ambas instalaciones son independientes.

Este Real Decreto genera una gran controversia al no facilitar el uso de energías renovables y la previsión es que en un futuro cercano sea más flexible.

11. Impacto ambiental

En este proyecto se ha buscado reducir al máximo su impacto ambiental, con la finalidad de minimizar las afectaciones al medio ambiente.

La Unión Europea, en su Séptimo Programa de Acción en materia de Medio Ambiente [33], tiene como objetivo alcanzar una mayor eficiencia en la gestión de los recursos y los residuos generados, con el fin de disponer de un modelo de producción y consumo más sostenible.

Para analizar el impacto ambiental hay que estudiar las diferentes fases en la vida del proyecto:

- Fabricación del material a utilizar en la instalación.
- Instalación.
- Vida útil.
- Desmantelamiento.

11.1. Fabricación

La fase de fabricación suele ser una de las etapas más críticas para el medio ambiente. La producción de las células fotovoltaicas es una actividad contaminante debido a la cantidad de energía necesaria durante su proceso de fabricación. Este impacto es compensado ya que la energía producida por estas células fotovoltaicas es 100% renovable. Además, las placas fotovoltaicas contienen materiales, como el aluminio y el silicio, que pueden ser reutilizados para la fabricación de nuevos productos.

11.2. Instalación

La fase de instalación de los postes tiene poco impacto paisajístico, ya que la adecuación topográfica del terreno para la colocación de los postes es mínima. Puede haber un bajo impacto acústico durante el proceso de instalación.

El embalaje de los materiales necesarios para la instalación será recogido, clasificado y depositado en los contenedores correspondientes según la legislación vigente.

11.3. Vida útil

El impacto ambiental durante la vida útil del proyecto será muy bajo comparado con otras alternativas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes de energía no renovables.

La energía solar fotovoltaica no genera emisiones contaminantes lo que conlleva una reducción en las emisiones de CO₂ con respecto a si esta misma energía se hubiera tenido que generar mediante el uso de energías no renovables.

No hay contaminación acústica.

La contaminación lumínica será la mínima necesaria para la iluminación del circuito.

La contaminación visual será mínima ya que los postes para el alumbrado no son voluminosos.

11.4. Desmantelamiento

Es la fase final de la vida de un proyecto. En nuestro caso, se trata de desmontar los postes que soportan los focos, placas fotovoltaicas y baterías.

El impacto paisajístico durante esta fase sería mínimo, ya que no hay que readecuar la topografía del terreno.

Puede haber un bajo impacto acústico durante el proceso de desmantelamiento.

Las afectaciones serán similares a las de la fase de instalación, pero en ésta habrá que proceder a la reutilización o reciclado de los elementos desmantelados.

11.5. Ahorro de emisiones contaminantes

Con el uso de la energía solar fotovoltaica para la iluminación del circuito se obtendrá un ahorro de emisiones contaminantes a la atmosfera. Este cálculo se ha efectuado a partir de un factor de conversión estimado por la Oficina Catalana del Cambio Climático (OCCC). Este factor de conversión se calcula a partir de cómo producir la misma energía mediante centrales de producción con energías no renovables con la proporción del mix energético de la red eléctrica peninsular.

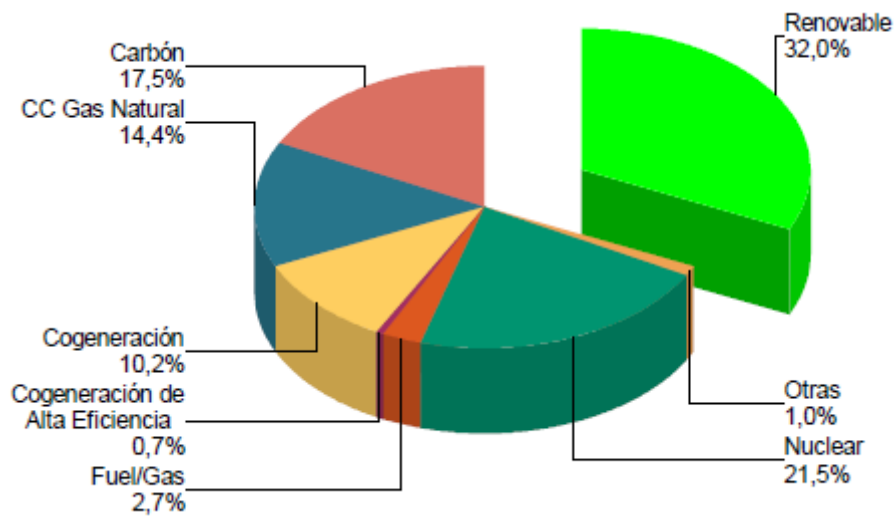


Figura 11.1-Mix energético del sistema eléctrico español 2017

Fuente: <https://gesternova.com/la-cnmc-certifica-que-toda-la-energia-comercializada-por-gesternova-en-2017-fue-de-origen-100-renovable/>

Como ya se vio en un apartado anterior, la potencia total necesaria para la iluminación del circuito es de aproximadamente 53 kW. Teniendo en cuenta que se usará unas 3 veces por semana durante todo el año obtenemos que la energía necesaria es de:

$$E = 53 \text{ kW} \cdot 6 \text{ h/día} \cdot 3 \text{ días/semana} \cdot 52 \text{ semanas/año} = 49.608 \text{ kW}\cdot\text{h/año}.$$

Tomando una combinación de todas las fuentes de energía no renovables (0,392 Kg de CO₂ por cada kW·h) se emitirían unos 19.446,3 Kg de CO₂. [34]

Como se desprende de los cálculos anteriores, este proyecto presenta una viabilidad ambiental destacable.

En conclusión, el impacto ambiental del proyecto es bajo. El uso de energías renovables lo hace un proyecto energéticamente sostenible.

Conclusiones

En el presente proyecto se ha diseñado un sistema de iluminación para el circuito de Castellolí alimentado por energía solar fotovoltaica, donde se ha analizado la situación actual del circuito, se ha visto la problemática y se han presentado soluciones.

Primeramente, se ha empezado con los estudios técnicos. En el estudio técnico de luminotecnia se ha presentado la viabilidad tecnológica de la instalación de focos a lo largo del trazado del circuito para su iluminación nocturna.

A continuación, se ha presentado la viabilidad tecnológica del uso de la energía solar fotovoltaica para la alimentación de los focos, así como un sistema de control remoto para su encendido/apagado.

El circuito de Castellolí, debido a su privilegiada situación, tiene capacidad para la organización de eventos de forma regular y poder aumentar su nivel de ingresos.

En el estudio económico efectuado, si se potencia el circuito de Castellolí, se acogen más eventos y se obtienen los ingresos planificados, el proyecto sería económicamente viable.

Finalmente, se ha presentado el impacto ambiental y el ahorro en emisiones contaminantes mediante el cálculo de la cantidad de CO₂ si se hubieran utilizado energías no renovables, concluyendo que el proyecto es medioambientalmente viable.

En conclusión, el proyecto es viable, tanto desde el punto de vista técnico como económico.

En lo que respecta a nivel personal, este trabajo me ha servido para poner en práctica los conocimientos adquiridos en los estudios de Grado, aumentar mis competencias investigando en temas novedosos y poder abordar por completo todas las fases de un proyecto de ingeniería.

Agradecimientos

Quisiera agradecer al Dr. Emilio Hernández Chiva, director de este Trabajo de Fin de Grado, por darme la oportunidad de participar en este proyecto sobre la energía solar fotovoltaica, por su colaboración en la resolución de dudas y por sus interesantes aportaciones para la redacción del presente informe.

A mi familia, por todo el soporte recibido durante mis estudios de Grado.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] Parcmotor Castellolí (Febrero 2018). Consultado en:
<http://www.parcmotor.com>
- [2] Ajuntament de Castellolí (Febrero 2018). Consultado en:
<https://www.castelloli.cat>
- [3] Turisme de l'Anoia (Febrero 2018). Consultado en:
<http://anoiaturisme.cat/anoia/parc-motor-de-castelloli/>
- [4] Repsol (Febrero 2018). Consultado en:
<https://www.boxrepsol.com/es/motogp/parcmotor-castelloli-un-circuito-de-velocidad-con-tunel-en-su-trazado/>
- [5] Todo Circuito (Febrero 2018). Consultado en:
<https://www.todocircuito.com/circuito/circuito-parcmotor-castelloli>
<https://www.todocircuito.com/reportajes/25-circuito-parcmotor-castelloli.html/pagina-1>
- [6] Iluminet. Revista de iluminación (Marzo 2018). Consultado en:
<http://www.iluminet.com/>
<http://www.iluminet.com/los-detalles-de-la-iluminacion-deportiva/>
<http://www.iluminet.com/ephesus-lighting-super-bow/>
<http://www.iluminet.com/como-iluminar-el-primer-gran-premio-f1-nocturno/>
- [7] Fútbol Club Barcelona (Marzo 2018). Consultado en:
[http://arxiu.fcbarcelona.cat/web/castellano/club/especials/aniversari_campnou/sabies_q
ue.html](http://arxiu.fcbarcelona.cat/web/castellano/club/especials/aniversari_campnou/sabies_que.html)
- [8] Circuito de Singapur (Marzo 2018). Consultado en:
<https://www.redbull.com/es-es/5-mejores-carreras-nocturnas-motos-coches-motor>
<https://www.vavel.com/es/formula1/870423-interlagos-instala-iluminacion-artificial.html>
- [9] Circuito de Losail (Marzo 2018). Consultado en:
<https://www.redbull.com/es-es/motogp-qatar-iluminacion-losail>

- [10] CITCEA-UPC - Luminotecnia (Marzo 2018). Consultado en:
<http://recursos.citcea.upc.edu/llum/>
- [11] UPC - Curso On-line de iluminación (Marzo 2018). Consultado en:
<http://grlum.dpe.upc.edu/manual/index2.php>
- [12] Comparativa luz halógena vs LED (Marzo 2018). Consultado en:
<https://www.mediatrends.es/a/92465/bombillas-halogenas-vs-bajo-consumo-vs-led-caracteristicas-consumo/>
- [13] Lámpara LED (Marzo 2018). Consultado en:
https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%A1mpara_led
- [14] Software para el diseño de iluminación LED (Marzo 2018). Consultado en:
<http://www.iluminet.com/software-para-el-diseno-de-iluminacion/>
- [15] Software para iluminación LED (Marzo 2018). Consultado en:
<https://es.scribd.com/doc/38671796/Software-para-iluminacion>
- [16] Energía solar fotovoltaica (Abril 2018). Consultado en:
<https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-solar/fotovoltaica/>
<https://erenovable.com/como-funcionan-los-paneles-solares/>
<http://solete.nichese.com/unionnp.html>
<http://www.electricidad-gratuita.com/energia%20fotovoltaica.html>
<http://www.solarinnova.net/es/productos/fotovoltaica/celulas/monocristalinas/156x156mm>
<http://www.diariodeciencias.com.ar/energia-solar-fotovoltaica-y-termica-diferencias-y-aplicaciones/>
<https://users.dcc.uchile.cl/~rosequel/celdasolar.html>
<http://www.solener.com/pregunta.html>
<https://es.slideshare.net/kapagobe15/paneles-solares-16571742>
<https://www.youtube.com/watch?v=h20bJDZCaCk>
<https://www.youtube.com/watch?v=pFJ96wUZT7E>
<https://www.youtube.com/watch?v=TJi7aetKZmk>
<https://www.youtube.com/watch?v=w7sRDy-IBlw>
<https://www.youtube.com/watch?v=wj9FRoiRHYc>
<https://www.youtube.com/watch?v=ncC-qGsWvAY>

- [17] Energías renovables (Abril 2018). Consultado en:
<https://www.implika.es/es/blog/ventajas-e-inconvenientes-de-las-energias-renovables>
<https://www.youtube.com/watch?v=5cVpl1WGmJA>
- [18] Autoconsumo vs red eléctrica (Abril 2018). Consultado en:
<http://www.electricidadijzahinos.com/index.php/servicios/instalaciones-solares>
<https://www.ecosistemasdelsureste.com/news/diferencias-entre-instalacion-solar-fotovoltaica-aislada-y-de-autoconsumo/>
- [19] Componentes del sistema autónomo (Abril 2018). Consultado en:
<http://pasosdelmetodocientifico.com/placas-fotovoltaicas-convertir-los-fotones-a-electrones>
<https://www.youtube.com/watch?v=bDZhl-JPgIQ>
<https://www.youtube.com/watch?v=5l5qBsMEI1I>
<https://www.youtube.com/watch?v=ioLVy2Q8OQ>
https://www.youtube.com/watch?v=31r_CaWsFRs
<https://www.youtube.com/watch?v=5Jy-4H29EvU&index=2&list=PLfWJBWUqkmeDTvZgim3KpmvPjSbQcHYNs>
- [20] Orientación de las placas solares (Abril 2018). Consultado en:
<http://www.lawebdelasenergiasrenovables.com/orientacion-de-placas-solares/>
https://www.damiasolar.com/actualidad/blog/articulos-sobre-la-energia-solar-y-sus-componentes/orientacion-e-inclinacion-de-las-placas-solares_1
<https://www.youtube.com/watch?v=90-gqzbVCCQ>
https://www.youtube.com/watch?v=NKGi_PNhSVw
<https://www.youtube.com/watch?v=WS7JVxrgk7k>
- [21] Cálculo de una instalación solar fotovoltaica (Abril 2018). Consultado en:
<http://clickrenovables.com/blog/como-calcular-una-instalacion-solar-fotovoltaica-en-5-pasos/>
<https://nergiza.com/como-calcular-una-instalacion-fotovoltaica-facil/>
https://www.youtube.com/watch?v=MdSN_Sblpb4&index=12&list=PLIHUMTywt20a14plj810cEVfvGw1UKKcP
<https://www.youtube.com/watch?v=bdSOE-G0B5A>
- [22] Cálculo de baterías (Abril 2018). Consultado en:
<https://www.youtube.com/watch?v=3y3tMlzoQtU&list=PLIHUMTywt20a14plj810cEVfvGw1UKKcP&index=9>
- [23] Catálogo de iluminación exterior Philips Lighting (Abril 2018).

- [24] Autosolar (Abril 2018). Consultado en:
<https://autosolar.es>
- [25] Mantenimiento de una instalación solar fotovoltaica (Abril 2018). Consultado en:
<https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/instalaciones-fotovoltaicas-tipos-de-mantenimiento/>
<https://www.youtube.com/watch?v=az3X2UQYNhU>
- [26] Red SIGFOX (Mayo 2018). Consultado en:
<https://ca.wikipedia.org/wiki/Sigfox>
<https://www.sigfox.com/en>
<https://www.nobbot.com/redes/sigfox-la-red-para-el-internet-de-las-cosas/>
<http://blog.330ohms.com/2017/05/11/que-es-sigfox-y-como-funciona/>
<https://www.xatakamovil.com/conectividad/la-conectividad-segun-sigfox-los-objetos-no-necesitan-bandas-anchas-sino-pequenos-mensajes>
<http://www.bcendon.com/las-redes-mas-usadas-en-el-iot/>
- [27] Circuito de Montmeló (Mayo 2018). Consultado en:
<http://www.ccma.cat/tv3/alacarta/telenoticies-vespre/el-circuit-de-barcelona-a-lespera-de-nous-fons-publics-per-la-seva-situacio-economica/video/5765288/>
<http://www.ccma.cat/tv3/alacarta/els-matins/v-aquilera-president-del-circuit-de-montmelo-necessitem-financament-per-garantir-el-futur-de-la-f1/video/5765363/>
<http://www.elcritic.cat/investigacio/circuit-de-catalunya-100-milions-deuros-dajudes-publicues-en-deu-anys-18756>
- [28] Nueva etapa de Parcmotor Castellolí (Mayo 2018). Consultado en:
<http://circuitparcmotor.com/arranca-una-nueva-etapa-circuit-parcmotor-castelloli/>
- [29] ETSEIB-UPC - Apuntes de la asignatura “Organització i Gestió” (Mayo 2018).
- [30] Cálculo de la inversión inicial (Mayo 2018). Consultado en:
<https://www.cuidatudinero.com/13074769/como-calculat-la-inversion-inicial>
<http://www.buenosnegocios.com/notas/276-3-ejemplos-calculo-inversion-inicial>
- [31] Normativa sobre iluminación (Mayo 2018). Consultado en:
<http://grlum.dpe.upc.edu/manual/disenoProyecto-requisitosDiseno.php>

[32] Normativa sobre energía solar fotovoltaica modalidad autoconsumo (Mayo 2018).

Consultado en:

https://unef.es/wp-content/uploads/dlm_uploads/2016/10/rd900_2015_y-propuesta-unef.pdf

<http://solartradex.com/blog/10-claves-para-entender-el-real-decreto-de-autoconsumo/>

<https://autosolar.es/blog/energia-solar-fotovoltaica/es-legal-tener-paneles-solares-preguntas-y-respuestas>

[33] Unión Europea y Medio ambiente (Mayo 2018). Consultado en:

https://europa.eu/european-union/topics/environment_es

[34] Ahorro de emisiones contaminantes CO₂ (Mayo 2018). Consultado en:

http://canviclimatic.gencat.cat/es/reduex_emissions/com-calculer-emissions-de-geh/factors_demissio_associats_a_lenergia

Bibliografía complementaria

<https://erenovable.com/ventajas-e-inconvenientes-de-la-energia-geotermica/>

<https://energiageotermica.wordpress.com/4-inconvenients-i-avantatges/>

<http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2010/12/30/la-diferencia-entre-celula-modulo-arreglo-y-sistema-solar/>

<https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/ubicacion-paneles>

<https://www.youtube.com/watch?v=XK6ylmGm74k>

<http://alternativasdeenergiah11.blogspot.com.es/>

<https://www.youtube.com/watch?v=oAmo6NKFIrs>

<https://www.quetzalingeneria.es/blog/por-que-es-mas-rentable-fotovoltaica-aislada-que-estar-conectado-a-la-red-en-una-casa-nueva/>

<http://www.grupodac.info/files/energia-fotovoltaica-aislada-de-red.pdf>

<http://www.etisa.com/wp-content/uploads/Barcelona-Farolas-Aut%C3%B3nomas-Fotovoltaicas-y-LED-SECARTYS-2016.pdf>

<https://autosolar.pe/blog/aspectos-tecnicos/conexion-en-serie-y-en-paralelo-de-paneles-solares>

<https://es.krannich-solar.com/es/productos.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=4xkKqjNchnY>

<https://www.youtube.com/watch?v=dIRXvtz4-Dc>

<http://www.lawebdelasenergiasrenovables.com/>